



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA DE SISTEMAS – INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

PROPUESTA DE UN PLAN DE ACCIÓN PARA OPTIMIZAR EL TRASLADO DE  
VÍCTIMAS DESPUÉS DE UN TERREMOTO

MODALIDAD DE GRADUACIÓN: TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. LUIS ISRAEL GODÍNEZ GIL

TUTOR  
DRA. MAYRA ELIZONDO CORTÉS, FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. JUNIO 2016



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: M. I. Fuentes Zenón Arturo

SECRETARIO: Dra. Flores De La Mota Idalia

VOCAL: Dra. Elizondo Cortés Mayra

1<sup>ER</sup> SUPLENTE: M. I. Rivera Colmenero José Antonio

2<sup>DO</sup> SUPLENTE: M. I. Durán Rojas María Guadalupe

Lugar donde se realizó la tesis: Universidad Nacional Autónoma de México,  
Facultada de Ingeniería

## Agradecimientos

*A Dios, por regalarme el don y la dicha de vivir en este tiempo.*

*A mi hijo Caleb, por ser mi inspiración y mi motivación para ser cada día un mejor humano.*

*A mi esposa Alejandra, por su amor, apoyo y trabajo mano a mano.*

*A mi familia, por recordarme siempre que están conmigo en todo momento, en especial a mi madre.*

*A mi asesora y amiga Dra. Mayra Elizondo, por su pasión por enseñar y motivar día con día la conclusión de esta etapa de mis estudios con su guía paciente.*

*A mi apreciable jurado, por sus amables y oportunas observaciones al presente trabajo de investigación.*

*A CONACYT, porque gracias a su apoyo he realizado mis estudios de maestría y el presente trabajo.*

*A la UNAM, porque ha sido mi segundo hogar y por siempre tener puertas abiertas para quien quiere aprender.*

*A la Facultad de Ingeniería, por seguir forjando el futuro de este país desde sus aulas.*

# Índice

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introducción .....                                                                           | 5  |
| 1. Sismicidad en México .....                                                                | 6  |
| 1.1 Estadística Sísmica .....                                                                | 10 |
| 1.2 Efectos de los Terremotos.....                                                           | 14 |
| 1.3 Estrategia en México ante Sismos de Gran Magnitud, “Plan Sismo”.....                     | 15 |
| 1.3.1 Directrices del “Plan Sismo”.....                                                      | 16 |
| 1.3.2 Operación del “Plan Sismo”.....                                                        | 16 |
| 1.3.3 Organización para la actuación del “Plan Sismo” .....                                  | 18 |
| 1.4 Planteamiento del problema .....                                                         | 20 |
| 1.5 Objetivos .....                                                                          | 22 |
| 1.5.1 Objetivo general.....                                                                  | 22 |
| 1.5.2 Objetivos específicos .....                                                            | 22 |
| 1.5.3 Preguntas de Investigación.....                                                        | 23 |
| 2 Marco de Referencia .....                                                                  | 24 |
| 2.1 Marco Teórico.....                                                                       | 24 |
| 2.2 Definiciones, métodos y modelos.....                                                     | 30 |
| 2.2.1 Estrategia.....                                                                        | 30 |
| 2.2.2 Puntos de reunión .....                                                                | 32 |
| 2.2.3 Problema de cobertura de conjuntos.....                                                | 34 |
| 2.2.4 Formulación de programación entera binaria del problema de cobertura de conjuntos..... | 35 |
| 2.2.5 Problema de ruta más corta.....                                                        | 36 |
| 2.2.6 Algoritmo de Floyd para el problema de ruta más corta. ....                            | 36 |
| 2.3 Estrategia de investigación .....                                                        | 38 |
| 3. Plan de acción .....                                                                      | 40 |
| 3.1 Modelo conceptual.....                                                                   | 40 |
| 3.2 Propuesta del plan de acción.....                                                        | 44 |
| 3.2.1 Fase I.....                                                                            | 44 |
| 3.2.2. Fase II .....                                                                         | 46 |
| 3.3 Definición de puntos de reunión.....                                                     | 46 |
| 3.4 Problema de cobertura .....                                                              | 47 |

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 3.5 Problema de ruta más corta.....                    | 49 |
| 3.6 Plan de acción en marcha.....                      | 52 |
| 4. Caso de Aplicación .....                            | 54 |
| 4.1 Zona de estudio .....                              | 54 |
| 4.1.1 Zonas críticas de la delegación Cuauhtémoc ..... | 54 |
| 4.1.2 Ubicación de hospitales.....                     | 58 |
| 4.1.3 Ubicación de puntos de reunión.....              | 58 |
| 4.1.4 Supuestos del modelo .....                       | 60 |
| 4.2 Modelo de cobertura. ....                          | 60 |
| 4.3 Resultados del modelo de cobertura.....            | 62 |
| 4.4 Modelo de ruta más corta.....                      | 63 |
| 4.5 Resultados del modelo de ruta más corta. ....      | 68 |
| Conclusiones.....                                      | 75 |
| Apéndice .....                                         | 77 |
| Anexo .....                                            | 78 |
| Bibliografía.....                                      | 81 |

## Índice de Figuras

|             |                                                                           |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1  | Cinturones sísmicos.....                                                  | 7  |
| Figura 1.2  | Zonificación sísmica de México.....                                       | 8  |
| Figura 1.3  | Zonificación sísmica de la Ciudad de México.....                          | 9  |
| Figura 1.4  | Gráfica de los sismos de mayor magnitud en México en el siglo XXI.....    | 10 |
| Figura 1.5  | Gráfica de los sismos de mayor magnitud en México en el siglo XX.....     | 11 |
| Figura 1.6  | Gráfica de la cantidad de sismos en México por año.....                   | 11 |
| Figura 1.7  | Alcances del plan.....                                                    | 18 |
| Figura 2.1  | Panorama de la Investigación de Operaciones ante la respuesta al desastre | 27 |
| Figura 2.2  | Simbología de puntos de reunión.....                                      | 33 |
| Figura 3.1  | Diagrama de Ishikawa para el problema de traslado de heridos.....         | 40 |
| Figura 3.2  | Fase I del plan de acción.....                                            | 45 |
| Figura 3.3  | Ejemplo de obtención del mapa de la zona.....                             | 49 |
| Figura 3.4  | Ejemplo de obtención de distancias.....                                   | 50 |
| Figura 3.5  | Ejemplo de red de distancias.....                                         | 51 |
| Figura 4.1  | Mapa de peligros sísmicos para la Delegación Cuauhtémoc.....              | 55 |
| Figura 4.2  | Colonias delimitadas dentro de la Delegación Cuauhtémoc.....              | 56 |
| Figura 4.3  | Colonia Doctores.....                                                     | 57 |
| Figura 4.4  | Delimitación de la zona.....                                              | 59 |
| Figura 4.5  | Numeración de nodos.....                                                  | 64 |
| Figura 4.6  | Matriz de distancias entre cada par de nodos.....                         | 65 |
| Figura 4.7  | Matriz de secuencias A inicial.....                                       | 66 |
| Figura 4.8  | Matriz de distancias resultante.....                                      | 69 |
| Figura 4.9  | Rutas resultantes.....                                                    | 71 |
| Figura 4.10 | Matriz de secuencias A resultante.....                                    | 72 |
| Figura 4.11 | Verificación de la secuencia.....                                         | 73 |

## Índice de tablas

|           |                                                                                     |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1.1 | Sismos de mayor magnitud desde 1887.....                                            | 13 |
| Tabla 1.2 | Descripción de actividades en las fases del Plan Sismo.....                         | 17 |
| Tabla 2.1 | Revisión bibliográfica para el traslado de heridos.....                             | 28 |
| Tabla 4.1 | Colonias dentro de cada zona de riesgo.....                                         | 55 |
| Tabla 4.2 | Hospitales seleccionados.....                                                       | 58 |
| Tabla 4.3 | Puntos de reunión seleccionados.....                                                | 58 |
| Tabla 4.4 | Tiempos de viaje entre puntos de reunión y hospitales en minutos.....               | 61 |
| Tabla 4.5 | Nodos correspondientes a hospitales y puntos de reunión.....                        | 67 |
| Tabla 4.6 | Distancia recorrida por la ruta más corta entre hospitales y puntos de reunión..... | 68 |
| Tabla 4.7 | Secuencia de nodos intermedios.....                                                 | 69 |



## Introducción

Cuando ocurre un desastre natural, las naciones enteras enfrentan difíciles problemas en los que se ven involucradas tanto organizaciones gubernamentales como no gubernamentales. Los gobiernos de las naciones asumen la responsabilidad de salvaguardar la vida de su población y ante esto se adoptan muchas acciones ya que son muchos los problemas que surgen cuando debe contrarrestar los efectos de un terremoto.

Ante estas acciones, la investigación de operaciones aporta sus herramientas para brindar un mejor apoyo a los gobiernos en el mundo.

En México, es posible que se repita la difícil situación de un terremoto y es por eso que se debe recurrir a todas las herramientas existentes con la finalidad de salvaguardar el mayor número de vidas y realizar las acciones de una manera eficiente y rápida.

Es por eso que el objetivo de esta investigación es proponer un plan de acción para los hospitales que se encuentran en zonas urbanas con el fin de optimizar el traslado de heridos después de ocurrir un terremoto, resolviendo los problemas de cobertura y de ruta más corta.

Debido a lo anterior, el presente trabajo se desarrolla de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se describe la problemática y se define el problema específico y los objetivos a alcanzar; en el Capítulo 2 se desarrolla el marco de referencia incluyendo el estado del arte del tema, el marco teórico con el que se trabaja en la investigación y la metodología a seguir; en el Capítulo 3 se desarrolla la propuesta de solución al problema, redactando los pasos a seguir de la estrategia y donde se incluye la solución de dos modelos matemáticos, uno de cobertura de conjuntos y el segundo de ruta más corta, para cumplir con el objetivo del trabajo; y en el Capítulo 4 se desarrolla el caso de aplicación para una zona establecida como de alto riesgo en la Ciudad de México, finalmente se presentan las conclusiones y la bibliografía.

## 1. Sismicidad en México

Se les llama sismos a los movimientos bruscos del terreno generados por disturbios tectónicos o volcánicos. A los movimientos sísmicos de mayor intensidad que dejan a su paso un alto nivel de destrucción se les llaman terremotos.

Los sismos y terremotos suelen ocurrir al final del llamado ciclo sísmico, que es el periodo de tiempo durante el cual se acumula deformación en el interior de la Tierra que más tarde se libera repentinamente. También existen otros factores que pueden generar sismos: desprendimientos de rocas en laderas de las montañas, hundimientos, o incluso actividad humana.

Estos movimientos sísmicos son propagados mediante ondas desde el hipocentro, que es el punto interior de la tierra donde se inicia un sismo. Estas ondas se presentan en tres tipos: longitudinales o primarias, transversales o secundarias y las superficiales. Siendo las ondas superficiales las que producen más daños. No todas las regiones de la tierra son igualmente propensas a los sismos y es por esto que la corteza terrestre se ha dividido en tres zonas distintas:

1. Regiones sísmicas (grandes movimientos sísmicos);
2. Regiones penesísmicas (sismos débiles y con poca frecuencia);
3. Regiones asísmicas (raramente se registran sismos).

Las zonas sísmicas en el mundo regularmente coinciden con los contornos de las placas tectónicas y con la ubicación de los volcanes activos, las cuales forman los tres principales cinturones sísmicos que son: el Circumpacífico, el Transasiático y el situado en el centro del océano Atlántico. En la Figura 1.1 se pueden observar la ubicación de los cinturones sísmicos en color rojo.

La República Mexicana es una de las naciones afectadas por el cinturón Circunpacífico, y por lo tanto presenta una actividad sísmica importante.

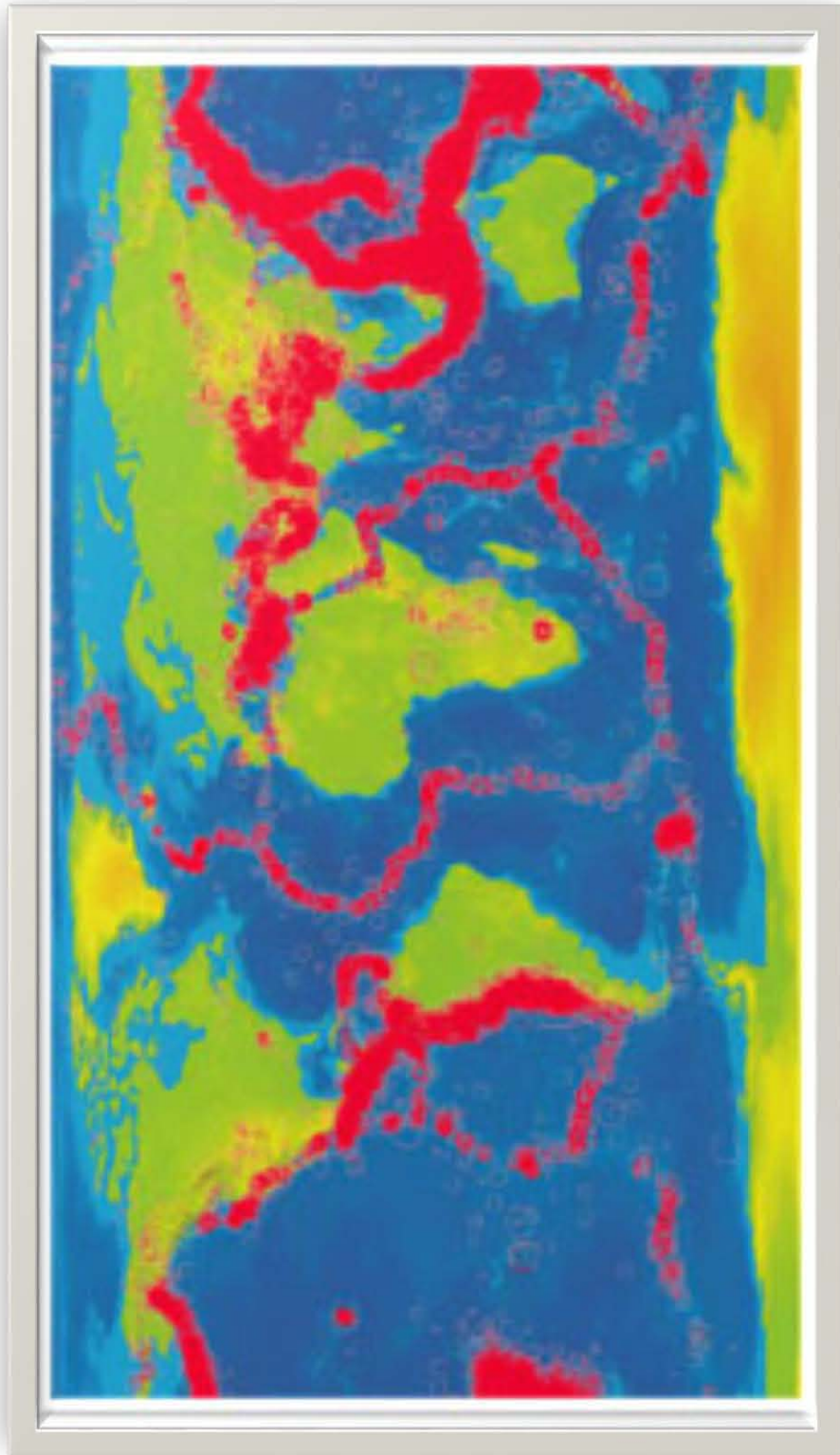


Figura 1.1 Cinturones Sísmicos. En la figura se pueden observar los cinturones sísmicos en color rojo. Obtenido de: <http://www.ssn.unam.mx/>

De acuerdo con el Servicio Sismológico Nacional, México está dividido en 4 zonas sísmicas A, B, C y D. La zona A es donde no se tienen registros históricos de sismos y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de sismos. Las zonas B y C son zonas donde se registran sismos no tan frecuentes o son zonas afectadas por altas aceleraciones en el suelo. La Zona D es donde se han registrado grandes sismos históricos, donde su ocurrencia es muy frecuente y las aceleraciones del suelo sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad. La Figura 1.2 ilustra la zonificación sísmica en México, en color naranja se identifica la zona D, en color amarillo la zona C, en color beige la zona B y en color verde la zona A.



Figura 1.2. Zonificación sísmica de México.

Zonificación del territorio mexicano de acuerdo con los registros sísmicos.

Obtenido de: <http://www.ssn.unam.mx/>

La Ciudad de México se encuentra ubicada en la zona B pero debido a las condiciones del subsuelo del valle de México pueden surgir altas aceleraciones.

En la zonificación de la Ciudad de México se distinguen tres zonas de acuerdo con el tipo de suelo:

- Zona I o de lomas (suelo rocoso);
- Zona II o de transición;
- Zona III o de lago (suelo lacustre).

En la Figura 1.3 se pueden observar en color verde la zona I, en color amarillo la zona II y en color rojo la zona III.

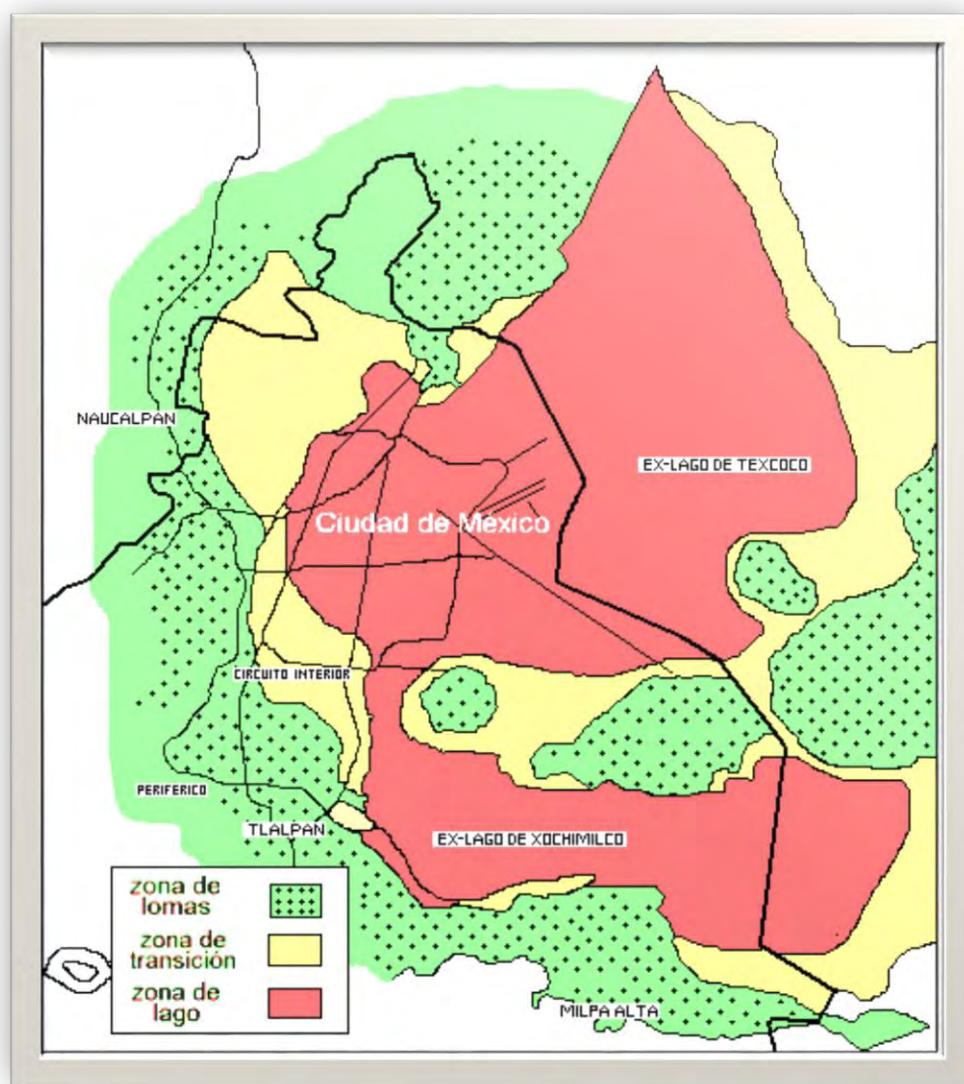


Figura 1.3. Zonificación sísmica de la Ciudad de México de acuerdo con su tipo de suelo. Obtenido de: <http://www.ssn.unam.mx/>



De acuerdo con la Norma Técnica Complementaria al reglamento de la ley de protección civil del Distrito Federal, hoy Ciudad de México ntc-002-spcdf-pv-2010 (disponible en: <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/3425.doc>) que establece los lineamientos técnicos para la aprobación, utilización, operación y funcionamiento de instrumentos de alerta sísmica en inmuebles de la Ciudad de México, se ha encontrado que las delegaciones de la Ciudad de México con mayor riesgo sísmico son: Cuauhtémoc, Benito Juárez, Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza, Iztacalco, Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac. Esto se debe a factores como: tipo de suelo, densidad poblacional, tipo de edificios, entre otros.

## 1.1 Estadística Sísmica

En el sitio de internet [www.tembloresenmexico.com](http://www.tembloresenmexico.com) y gracias a un estudio realizado por el Instituto de Geofísica de la UNAM, se obtuvo la siguiente información con respecto a la sismicidad en México:

- Anualmente se registran más de 100 temblores con magnitud mayor o igual a 4.5 grados en la escala Richter (ver apéndice);
- Ocurren 5 sismos con magnitud mayor o igual a 6.5 grados en la escala Richter cada cinco años;
- Se espera un sismo con magnitud mayor o igual a 7.5 grados en la escala Richter cada 10 años.

En la Figura 1.4 Se presenta una gráfica que representa los sismos más fuertes del siglo XXI con magnitud mayor o igual que 5.5.



Figura 1.4. Gráfica de los sismos de mayor magnitud en México en el siglo XXI.

Obtenido de: <http://www.tembloresenmexico.com/>

México es un territorio ligado al fenómeno sísmico desde tiempos prehispánicos pero la información hasta antes del siglo XX es prácticamente nula.

En la Figura 1.5 se presenta una gráfica que muestra los sismos más fuertes del siglo XX con magnitud mayor o igual que 6.5.



Figura 1.5. Gráfica de los sismos de mayor magnitud en México en el siglo XX.  
Obtenido de: <http://www.tembloresenmexico.com/>

En la Figura 1.6 se muestra la cantidad de temblores al año en México.



Figura 1.6. Gráfica de la cantidad de sismos en México por año.  
Obtenido de: <http://www.tembloresenmexico.com/>

De acuerdo con la información del Servicio Sismológico Nacional, en México se han registrado 133 sismos desde el 12 de marzo de 2000 al 19 de septiembre de 2013 con una magnitud mayor a 5.5 grados en la escala de Richter (ver apéndice). Tan sólo en 2012 se registraron más de 20 temblores mayores a 5.5 grados. A continuación, en la Tabla 1.1 se muestra un resumen de los sismos de mayor magnitud en México desde 1887.

Debido a la actividad sísmica en la Ciudad de México, su infraestructura con poca planeación y adecuada a lo previamente construido y a su sociedad desinteresada en la prevención y actuación ante desastres, los terremotos han dejado a su paso un número de víctimas y daños en esta ciudad. Precisamente, uno de los objetivos de los reglamentos de construcción en México se ha redactado con la finalidad de brindar seguridad estructural a las edificaciones y construcciones en general contra la actividad sísmica en las diferentes zonas del país.

Un terremoto es una situación potencial en México, ya que a la fecha ya se han registrado terremotos en toda su historia y esto lo ha llevado a no dejar de lado la actividad sísmica y sus efectos.



| Fecha de ocurrencia | Lugar del epicentro | Magnitud en escala Richter | Muertes |
|---------------------|---------------------|----------------------------|---------|
| 1887 Mayo, 3        | Sonora              | 7.4                        | 51      |
| 1907 Abril, 15      | Guerrero            | 7.7                        | 0       |
| 1911 Junio, 7       | Guerrero            | 7.7                        | 45      |
| 1931 Enero, 15      | Oaxaca              | 7.8                        | 114     |
| 1932 Junio, 3       | Jalisco             | 8.1                        | 45      |
| 1932 Junio, 18      | Colima              | 7.8                        | 0       |
| 1957 Julio, 28      | Guerrero            | 7.9                        | 68      |
| 1959 Agosto, 26     | Veracruz            | 6.8                        | 20      |
| 1962 Mayo, 11       | Guerrero            | 7.0                        | 4       |
| 1962 Mayo, 19       | Guerrero            | 7.1                        | 3       |
| 1964 Julio, 6       | Guerrero            | 6.9                        | 30      |
| 1965 Agosto, 23     | Oaxaca              | 7.3                        | 6       |
| 1968 Agosto, 2      | Oaxaca              | 7.1                        | 18      |
| 1979 Octubre, 15    | California          | 6.4                        | 0       |
| 1985 Septiembre, 19 | Michoacán           | 8.0                        | 9,500   |
| 1999 Junio, 15      | Centro de México    | 7.0                        | 0       |
| 1999 Septiembre, 30 | Oaxaca              | 7.5                        | 0       |
| 2002 Febrero, 22    | Mexicali            | 5.7                        | 0       |
| 2003 Enero, 22      | Colima              | 7.6                        | 29      |
| 2006 Enero, 4       | Golfo de California | 6.6                        | 0       |
| 2006 Agosto, 11     | Michoacán           | 5.9                        | 0       |
| 2008 Febrero, 12    | Oaxaca              | 6.5                        | 0       |
| 2009 Agosto, 3      | Golfo de California | 6.9                        | 0       |
| 2009 Diciembre, 30  | Baja California     | 5.9                        | 0       |
| 2010 Abril, 4       | Baja California     | 7.2                        | 2       |
| 2012 Marzo, 20      | Oaxaca              | 7.4                        | 0       |
| 2012 Abril, 11      | Michoacán           | 6.5                        | 0       |
| 2012 Abril, 12      | Baja California Sur | 7.0                        | 0       |
| 2012 Mayo, 1        | Chiapas             | 7.2                        | 0       |
| 2012 Noviembre, 8   | Chiapas-Guatemala   | 7.3                        | 0       |

Tabla 1.1. Sismos de mayor magnitud desde 1887. Obtenido de:  
<http://www.tembloresenmexico.com/>

## 1.2 Efectos de los Terremotos

El 19 de septiembre 1985 la Ciudad de México se vio sacudida por un terremoto. Su magnitud fue de 8.1, según informó el Instituto de Geofísica de la UNAM, con una duración de casi cuatro minutos, de los cuales, un minuto y treinta segundos correspondieron a la etapa de mayor movimiento. Esto ocasionó daño considerable en estructuras de diseño especial; estructuras con armaduras bien diseñadas perdiendo su posición vertical; gran daño en edificios con colapso parcial; los edificios se desplazaron de los cimientos; grietas fueron visibles en el suelo y algunas tuberías subterráneas se rompieron.

El terremoto del 85 dejó a su paso muertos, heridos, desaparecidos, damnificados; edificios públicos, privados y casas habitacionales destruidas; inmuebles en peligro de caer; interrupción en el servicio de agua, energía y teléfonos; fugas de agua y gas; múltiples rupturas en el asfalto y la paralización total en el servicio de transporte colectivo. De todo lugar surgieron brigadas de rescate; hospitales y ambulancias no se daban abasto, mientras que la escasez de medicamentos y sangre tuvieron como consecuencia la pérdida de muchas vidas que pudieron ser salvadas.

La noche del día siguiente se presentó un nuevo sismo a las 19:38 hrs, con magnitud de 7.6 grados Richter, con duración de un minuto y medio. Como consecuencia, se derrumbaron 20 edificios más y el pánico fue inevitable.

El gobierno de la ciudad, dio cifras preliminares del desastre: aproximadamente mil personas atrapadas entre los escombros; cinco mil heridos y tres mil damnificados; 250 edificios caídos y otros 50 en peligro de derrumbarse. Entre los edificios colapsados y que por su importancia destacan, están: el hospital Juárez de 11 pisos, donde se encontraban, se dice, unas 700 personas; la unidad de ginecología del Hospital General, con más de 500 pacientes y un número indeterminado de niños recién nacidos; el edificio "Nuevo León" en Tlatelolco, donde vivían 185 familias; un multifamiliar de la Unidad Juárez; los hoteles: Regis, Montreal, De Carlo, Romano, Principado y Versailles con un número indeterminado de huéspedes.

Desastres naturales como terremotos siempre causan un grado muy alto de daños, especialmente en áreas altamente habitadas donde miles de personas pueden resultar heridas o incluso morir.

Los eventos más comunes provocados por un evento sísmico en el país son:

- Destrucción de viviendas;
- Destrucción de infraestructura;
- Daños diversos al suelo;
- Deslizamientos o derrumbes.

Al paso de un terremoto, las diferentes áreas involucradas se pueden catalogar de la siguiente manera:

- Edificios colapsados;
- Zonas que requieren ser estabilizadas;
- Zonas que requieran ser restauradas para una mejor accesibilidad (calles);
- Zonas que no presentan daños mayores.

En las zonas arriba mencionadas es muy probable que se presenten personas heridas que necesitan ser atendidas. La condición de los rescatados puede ser:

- Herido atrapado;
- Heridos en áreas abiertas;
- Sin heridas graves.

Para dar respuesta a esta necesidad de atención médica de emergencia y demás servicios que se requieren después de un terremoto, muchos países han desarrollado una serie de acciones para ejecutar antes, durante y después de sismos de gran escala, así como para sismos de escala menor.

México es uno de los países que ha desarrollado un plan para dar respuesta y atención a la población que, después de un terremoto, requiere diferentes tipos de ayuda: rescate, atención médica, distribución de víveres, transporte de heridos, etc.

Este plan ha sido desarrollado para dar apoyo a las acciones que llevan a cabo las diferentes instituciones que intervienen para dar atención a la población que lo requiera con el fin común de salvar, dar atención y rescatar al mayor número de personas afectadas y cuya vida corra un gran riesgo a causa del terremoto. Este plan es conocido como “Estrategia de preparación y respuesta de la Administración Pública Federal, ante un sismo y tsunami de gran magnitud *Plan Sismo*”.

### 1.3 Estrategia en México ante Sismos de Gran Magnitud, “Plan Sismo”.

La Estrategia de preparación y respuesta de la Administración Pública Federal, ante un sismo y tsunami de gran magnitud “Plan Sismo”, tiene como objetivo establecer el marco de acción del Gobierno Federal en apoyo a las entidades federativas, la sociedad civil y el sector privado para brindar a la población una atención efectiva y oportuna ante un escenario de sismo y tsunami de gran magnitud en México. Con esto, pretende reducir los daños y consecuencias; definir el esquema de respuesta institucional a ser adoptado; y garantizar la continuidad del gobierno mediante el

restablecimiento de los servicios esenciales y la infraestructura pública en zonas afectadas, dando auxilio, seguridad, alivio, salud, alimentación, refugio y protección a la población. Por este motivo, el “Plan Sismo” se activa inmediatamente después de un terremoto.

El Comité Nacional de Emergencia, es el órgano encargado de la coordinación de acciones y toma de decisiones en situaciones de emergencia y desastre. Éste, tiene como objetivos analizar la situación de emergencia o desastre; priorizar las medidas urgentes que deben hacer frente a la situación; proveer los recursos materiales y financieros para las acciones de auxilio y estabilización; vigilar el cumplimiento de las acciones acordadas; y mantener informada a la población.

Esta estrategia se encuentra publicada en el sitio: <http://www.sismo.gob.mx/>

### 1.3.1 Directrices del “Plan Sismo”

A fin de formalizar el auxilio a la población, la presidencia dictará las directrices generales de este plan. Éstas son:

Primera directriz. El Gobierno Federal hace un llamado de alerta a la población;

Segunda directriz. El Presidente de la República instruye el auxilio inmediato de la población;

Tercera directriz. El Presidente de la República ordena el apego a la legalidad;

Cuarta directriz. El Presidente de la República presenta a la población su estrategia general de respuesta.

Es en estas directrices donde se deja claro que es de extrema urgencia brindar atención a la población que lo requiera.

### 1.3.2 Operación del “Plan Sismo”

Después de que ocurre un terremoto, comienza la etapa de operación, donde todas las acciones instruidas por la presidencia en las directrices del plan se llevan a cabo. Este plan contempla 2 fases para la implementación de las operaciones de respuesta y restablecimiento. La siguiente tabla muestra las prioridades en cada fase.

| Fase | Duración                                                                                                     | Prioridades                                                                                                                                                                                                                           |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1    | Inicia el día 0 con cualquier reporte de sismo y tsunami de gran magnitud y termina a las 24 horas del día 3 | a) Poner a disposición todos los recursos necesarios para salvar vidas, proteger la propiedad y preservar las estructuras sociales, económicas y políticas de las entidades federativas afectadas.                                    |
|      |                                                                                                              | b) Iniciar la evaluación de la situación que incluya la recolección, análisis y distribución de la información entre los Centros de manejo de la emergencia.                                                                          |
|      |                                                                                                              | c) Iniciar la verificación de las comunicaciones, movilización del personal clave y la activación de dispositivos de alertamiento interno y externo que enlacen a los niveles de gobierno, fuerzas de respuesta y público en general. |
|      |                                                                                                              | d) Reunir a los grupos de respuesta establecidos en el plan.                                                                                                                                                                          |
|      |                                                                                                              | e) Iniciar los planes de refugios temporales y centros de atención a la población.                                                                                                                                                    |
|      |                                                                                                              | f) Enviar brigadas de apoyo establecidas e instalar el Comité Nacional de Emergencias.                                                                                                                                                |
| 2    | Inicia al primer minuto del día 4 y termina a las 24 horas del día 15                                        | a) Continuar con el empleo de los recursos.                                                                                                                                                                                           |
|      |                                                                                                              | b) Seguir con la evaluación de la situación.                                                                                                                                                                                          |
|      |                                                                                                              | c) Restablecer las comunicaciones, movilizar todas las fuerzas de respuesta para atender las necesidades de la población y continuar con los alertamientos.                                                                           |
|      |                                                                                                              | d) Operar y dar apoyo logístico a los refugios temporales y centros de atención a la población.                                                                                                                                       |
|      |                                                                                                              | e) Iniciar los planes de movilización establecidos como apoyo a las áreas de logística, refugios temporales y centros de atención a la población.                                                                                     |
|      |                                                                                                              | f) Restablecer los servicios estratégicos.                                                                                                                                                                                            |

Tabla 1.2. Descripción de Actividades en las fases del Plan Sismo.

Obtenida de: *Estrategia de preparación y respuesta de la Administración Pública Federal, ante un sismo y tsunami de gran magnitud “Plan Sismo”*; SEGOB.

Al término de la fase 2 continuarán las operaciones, estas acciones quedan fuera del alcance de este plan, el “Plan Sismo”.

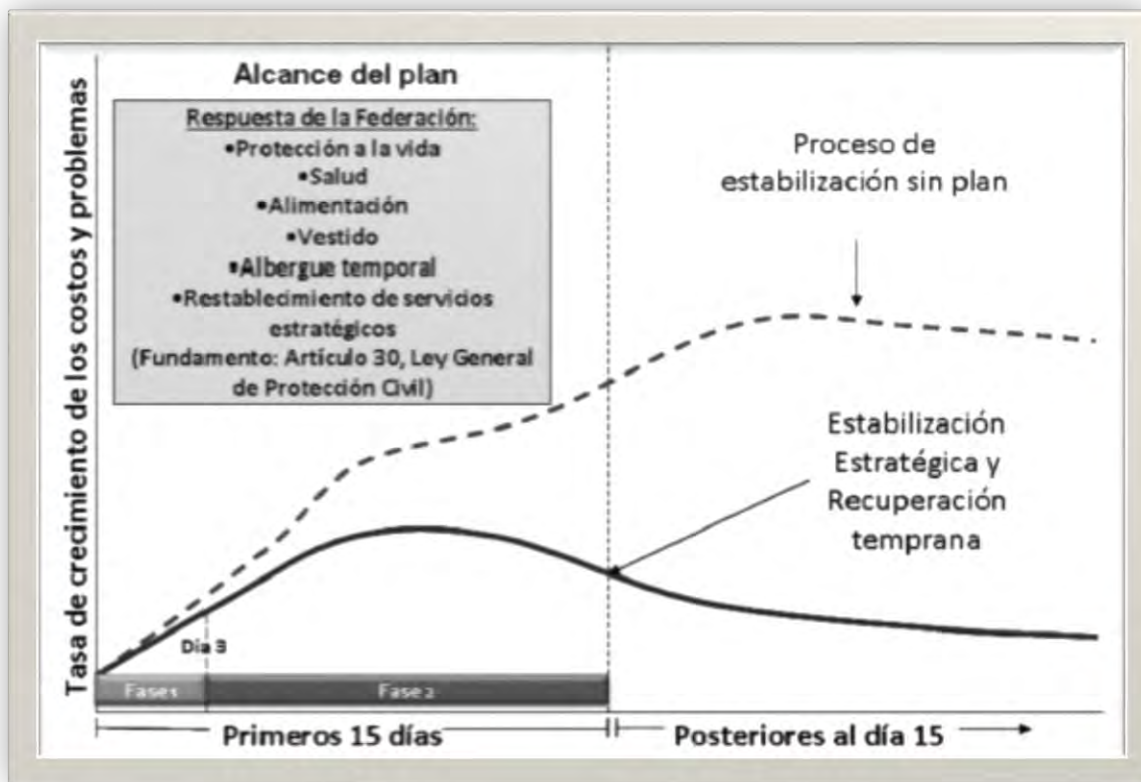


Figura 1.7: Alcances del plan; en la figura se observa la duración de las fases y sus alcances. Obtenida de: *Estrategia de preparación y respuesta de la Administración Pública Federal, ante un sismo y tsunami de gran magnitud “Plan Sismo”*; SEGOB.

### 1.3.3 Organización para la actuación del “Plan Sismo”

De acuerdo con esta estrategia, se establece una organización basada en tres Ejes de Acción, el eje operativo, logístico y administrativo. Para fines de esta investigación, vale la pena indagar más en el eje operativo del plan que en los otros.

Es el eje operativo el que dirige todas las actividades de atención directa a la población y está dividido en grupos. En él se encuentra el grupo de Búsqueda y Rescate que tiene como objetivo implementar las tareas de búsqueda y rescate con la finalidad de salvaguardar la vida de la población y establecer los criterios básicos de actuación y será coordinado por la Secretaría de Defensa Nacional y la Secretaría de Marina. La secretaria de Defensa Nacional ha establecido el plan de auxilio a la población civil en casos de desastre, denominado el “PLAN DN-III-E”,

donde se establecen los lineamientos para realizar actividades de auxilio a la población afectada por un desastre.

El grupo de Búsqueda y rescate está integrado por varios organismos entre ellos la Secretaría de Salud y la Cruz Roja Mexicana, los cuales realizarán las actividades correspondientes para coordinar la actuación de los grupos de rescate y salvamento y establecer la logística para garantizar los recursos necesarios para los rescatistas, tales como transporte, comunicación, apoyo logístico, seguridad y centros de mando, entre otros.

Dentro de los esfuerzos de este grupo se incluyen la búsqueda y asignación de recursos para salvar el mayor número de vidas, esto incluye: apoyo humano y mecánico para buscar heridos atrapados; extraer a los heridos de zonas de peligro; valorar el estado de las víctimas; otorgar atención médica a los necesitados y en su caso transportarlos a un centro de atención médica, entre otras acciones. Todo con la finalidad de minimizar las consecuencias del desastre natural.

Estas consecuencias generalmente son medidas en cifras, esto es: número de personas heridas, rescatadas, extraviadas y o fallecidas; el número de edificios dañados y o colapsados; costo estimado, en pesos, del desastre; etc. De acuerdo con este plan, la minimización de muertes entre la población es uno de sus objetivos principales y debería ser el más importante.

Cuando hablamos de brindar atención médica de emergencia, tanto en casos de enfermedad o de accidentes, se ha visto que un factor determinante es el tiempo que se requiere para que a un herido se le haga llegar la atención médica necesaria, es decir, el tiempo de respuesta ante un accidente.

EL tiempo en que se brinda esta atención es afectado por varios factores, entre ellos está el momento en que ocurre el terremoto, la disponibilidad de atención en los hospitales, la disponibilidad de ambulancias, el tiempo en que la atención del grupo de búsqueda y rescate acude y considerar el ambiente de caos y confusión entre la población.

Como se ha mencionado antes y de acuerdo con la situación vivida en terremotos pasados, los efectos de los terremotos en la infraestructura pueden ser: daños en edificios, edificios colapsados, grietas en las calles, tuberías rotas y, en general, muchas zonas de riesgo como son gasolineras, ductos de gas, algunas industrias, etc., que en general, afectan a las calles en que se encuentran situados y el libre tránsito en ellas, de manera que se entorpecen las medidas que cualquier equipo de rescate pueda implementar.

Para alcanzar el objetivo de minimizar la pérdida de vidas humanas, los equipos de rescate deberán prever no sólo esta situación sino muchas más que, llegado el



momento, pudieran causar conflicto para actuar con efectividad ante un terremoto en la ciudad.

#### 1.4 Planteamiento del problema

Ante los requerimientos de la población afectada por un sismo de gran magnitud ¿cómo se puede contribuir con el “plan” para realizar de forma más eficiente el traslado de víctimas por medio del uso de ambulancias en una situación de desastre provocada por un terremoto en la Ciudad de México?

Como se ha mencionado anteriormente, la Ciudad de México es una zona con actividad sísmica muy importante ya que, por su tipo de suelo, las ondas sísmicas se propagan fácilmente provocando situaciones de riesgo.

Debido a los efectos que causan los terremotos, es de gran utilidad desarrollar un estudio que intervenga apoyando en la respuesta ante este tipo de situaciones, pues es evidente el riesgo de sismos o terremotos en la ciudad y, de hecho, algunas Delegaciones Políticas que por sus características son más propensas a sufrir daños, podrían resultar severamente dañadas.

Las zonas más vulnerables lo son debido a sus características geológicas, además de otros factores, como la gran cantidad de habitantes, la calidad de infraestructura y sus rutas de acceso o evacuación.

Debido a la incapacidad de predecir un terremoto y para asegurar que se brinde atención médica oportuna a los heridos, es necesario que las instituciones involucradas estén preparadas con estrategias de acción para los grupos que intervienen en el rescate y atención médica, con el fin de evitar caos, anarquía en las acciones y se logre trabajar en conjunto hacia un mismo objetivo.

Cuando ocurre un desastre natural, éste deja como resultado gran cantidad de personas con diferentes lesiones que requieren ser atendidas. Atender a las personas heridas, representa diferentes acciones de acuerdo con los niveles de atención médica que cada herido requiera ya que, no todos los heridos requieren ser hospitalizados. Para los heridos que requieren ser hospitalizados, y, por lo tanto trasladados, se requiere que este traslado se lleve a cabo de manera rápida, pues el tiempo de traslado hacia un hospital resulta crucial para salvar el mayor número de vidas posible.

El transporte de heridos hacia un centro de atención (hospital) es parte de las funciones que tiene el grupo de Búsqueda y Rescate (establecido en el “Plan sismo”) y por lo tanto, es un problema que requiere de soluciones eficientes. Ya que



la Secretaría de Salud y la Cruz Roja forman parte de este grupo, se piensa que es de gran utilidad un estudio que optimice los recursos que son necesarios en la ejecución de esta tarea, como son: hospitales, ambulancias o vehículos de traslado, paramédicos, enfermeras y médicos, y que de una forma integral, se pueda contribuir a la disminución de daños y pérdidas humanas generados por la situación de desastre.

Es por esto que un problema que se debe atender cuando se presenta un terremoto es cómo realizar el traslado de las personas heridas por medio de vehículos hacia los centros de atención, considerando que debido al terremoto pueden presentarse bloqueos en las calles por derrumbes, rupturas de tuberías o zonas de riesgo potencial como estaciones eléctricas, gasolineras o de gas, puentes, etc.

Para brindar atención médica a los heridos de cierta ubicación, es posible considerar diferentes nodos de concentración para facilitar el acceso de las ambulancias, entonces, se requiere determinar la ruta más rápida desde este punto de concentración a una unidad de atención médica.

Para alcanzar esta meta, es posible proponer una estrategia que ordene un procedimiento para la respuesta ante un terremoto, de tal manera que el traslado de heridos sea un problema que se solucione de manera eficiente.

Como se mencionó antes, el Gobierno de México ha implementado una estrategia para la respuesta ante sismos y/o tsunamis, es entonces, que esta investigación pretende apoyar dicha estrategia para actuar en conjunto con las acciones que implementan las autoridades.

El “plan sismo” implementado por el gobierno de México, únicamente explica las acciones que realizarán las autoridades gubernamentales hasta un nivel administrativo, pero no se definen acciones concretas para la actuación en el rescate de personas heridas. Por este motivo, es necesario clarificar las acciones que en la realidad se deberán ejecutar por todas las instituciones e incluso por la población misma, con el objetivo de mejorar la ejecución de cada una de las acciones llevadas a cabo para el salvamento de personas afectadas por un desastre natural.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

El desarrollo de la investigación tiene como objetivo proponer un plan de acción para los hospitales en zonas urbanas que disminuya el tiempo de traslado de heridos después de un terremoto mediante el uso de los problemas de cobertura y de ruta más corta, aplicándolo al caso de la Delegación Cuauhtémoc de la Ciudad de México.

Para llevar a cabo este objetivo, se pretenden mencionar y abordar los problemas más importantes a los que se enfrenta el traslado de heridos y dar una solución por medio de las herramientas de Investigación de Operaciones, modelo de Cobertura de conjuntos y de ruta más corta. De esta manera, se pretende que los métodos propuestos en esta investigación contribuyan con la estrategia de preparación y respuesta que adopte el gobierno mexicano ante un sismo de gran magnitud.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- ✓ Mostrar la importancia del uso de un plan de acción como respuesta a los desastres;
- ✓ Conocer las medidas y acciones que implementan el gobierno y las ambulancias en situaciones de desastre para el traslado de heridos;
- ✓ Desarrollar a detalle un plan de acción para brindar traslado rápido a víctimas de terremoto incluyendo modelos que resuelvan los problemas de cobertura y ruta más corta para dar atención a nodos de demanda;
- ✓ Desarrollar el caso de aplicación para una zona de la Delegación Cuauhtémoc de la Ciudad de México debido a su alto riesgo sísmico.
- ✓ Mostrar la utilidad y uso de algunos modelos de Investigación de Operaciones en una situación de desastre.

### 1.5.3 Preguntas de Investigación

A lo largo del desarrollo de esta investigación se pretende descubrir la respuesta a las siguientes preguntas:

- ✓ ¿Qué problemas se enfrentan en una situación de terremoto?
- ✓ ¿Qué acciones se pueden implementar a la estrategia establecida por el gobierno mexicano ante casos de terremotos?
- ✓ ¿Cómo se puede trabajar con la demanda de un servicio médico distribuida en una zona?
- ✓ ¿Cómo se puede distribuir la demanda de atención médica en diferentes puntos a un número dado de hospitales?
- ✓ ¿Cómo se puede optimizar el traslado de heridos?
- ✓ ¿Qué métodos son útiles para identificar la distancia mínima que recorrería un vehículo?
- ✓ ¿Se puede establecer un plan de acción para los hospitales en una situación de terremoto?

En el siguiente capítulo, se profundiza en el problema por medio del trabajo de otros autores y las técnicas que se han utilizado para abordarlo, por lo cual, en el estado del arte se hace un breve resumen del trabajo previo para el traslado de heridos, también se describe la propuesta de este trabajo de investigación, se describen las herramientas y términos que se utilizan para ello en el marco teórico y se describe la metodología utilizada para lograr el objetivo propuesto.

## 2 Marco de Referencia

### 2.1 Marco Teórico

Los terremotos son problemas inevitables considerados desastres naturales, que ponen a prueba la capacidad de comunidades, naciones y regiones para proteger efectivamente a su población y su infraestructura a fin de reducir las pérdidas humanas y de propiedades y, a su vez, conseguir la pronta recuperación a partir de las operaciones ante estos desastres. Se consideran “operaciones para el desastre” a aquel conjunto de trabajos u operaciones que se realizan antes, durante y después del desastre, con el objetivo de prevenir pérdidas humanas, reducir su impacto en la economía o regresar a un estado de normalidad (Green III, 2006).

De acuerdo con la clasificación que realiza Green III en su artículo, el desarrollo de estudios sobre las operaciones para los desastres comienzan a partir de 1980 y, a partir del año 2000 se desarrollan mayor número de estudios, los cuales representan cerca del 50% de los que se habían realizado hasta entonces. En esta clasificación, también se muestra que las técnicas con las que se han tratado los problemas, mayormente son la optimización y la simulación, también se han utilizado herramientas estadísticas y, muy poco, los métodos suaves<sup>1</sup>. Estas herramientas han sido utilizadas con los objetivos principales de mitigar, preparar y responder; muy poco se ha desarrollado con enfoque a la recuperación.

De acuerdo con la recopilación que realizaron Caunhye, Nie y Pokharel (2012), las operaciones ante los desastres han sido clasificadas de acuerdo con el momento en que se implementan, pre-desastre o post-desastre. Las principales operaciones que se han desarrollado están clasificadas en:

- Ubicación de instalaciones;
  - Ubicación-evacuación;
- Ubicación con distribución de ayuda;
- Distribución de ayuda y transporte de víctimas;
  - Asignación de recursos;
  - Flujo de mercancía;
  - Asignación de recursos con flujo de mercancía.

<sup>1</sup>Los métodos suaves se involucran en problemas complejos donde se requiere encontrar una solución no necesariamente numérica pues este tipo de problemas involucra factores sociales y políticos (Checkland, P., 1990).

Es debido a estas diferentes operaciones, que los enfoques para tratar problemas con desastres naturales pueden ser muy distintos. Por ejemplo, el problema de un terremoto puede ser atacado con el objetivo de minimizar las pérdidas humanas por medio del transporte rápido hacia un hospital proponiendo un modelo de ruteo, o por medio de la asignación de recursos proponiendo un modelo de planeación de actividades (*scheduling*).

Los autores Najafi, Eshghi y Dullaert (2012) sostienen que, generalmente existen dos actividades de intervención más importantes durante la respuesta a un terremoto, estas son la evacuación de personas y la logística de materiales, las cuales están dentro de las actividades de respuesta al desastre. Debido a que en el horizonte de planeación de los esfuerzos de ayuda ante un terremoto, la red de datos de demanda, los suministros y los hospitales son usualmente inciertos, estos autores proponen el modelo estocástico para la gestión logística (*Stochastic Model for Logistics Management, SMLM*) con el cual dan prioridad al servicio a los heridos, después al envío de mercancía de ayuda y por último, a la minimización de vehículos.

Los terremotos causan un alto grado de daño especialmente en áreas densamente habitadas. Miles de personas pueden resultar afectadas o incluso morir. Según Friedrich, Gehbauer y Rickers (2000), un aspecto importante, que ayuda a determinar el número total de fallecimientos debido a un terremoto, es la ejecución de la Búsqueda y Rescate (*Search and Rescue, SAR*) en los primeros días y esto está determinado por el efectivo uso de los recursos técnicos disponibles. En su artículo, se formula un modelo para determinar una programación de los recursos a fin de dar solución a esta cuestión considerando que los heridos deben ser clasificados para priorizar situaciones. El objetivo del modelo, es minimizar el número de muertes encontrando la mejor asignación de recursos disponibles a las áreas de operación después de un terremoto. Utilizan los métodos heurísticos Búsqueda Tabú (*Tabu Search*) y Recocido Simulado (*Simulated Annealing*) para la solución del problema.

Viswanath and Peeta (2003), mencionan que la planificación de la gestión de desastres a nivel de red es vital para responder con eficacia a los desastres naturales y los problemas relacionados con la seguridad, por ejemplo: la disponibilidad de la red de transportación es crítica para la respuesta de emergencia eficiente. Formulan un problema de diseño de redes multiproducto (MCNDP) con la máxima cobertura. El problema es formulado con dos objetivos por medio de la modelación entera binaria. Es un problema multi-objetivo que busca minimizar el costo de transporte y maximizar la cobertura de las personas atendidas.

El transporte de víctimas consiste en el traslado de personas heridas de la zona de riesgo a alguna zona segura, el transporte se realiza a un centro de atención donde los heridos reciben ayuda médica.

La Investigación de Operaciones ha puesto al servicio sus herramientas matemáticas para realizar modelos que permitan tratar con el problema del transporte de heridos por causa de desastres naturales. En esos exitosos intentos, algunos autores han participado proponiendo diferentes enfoques con los que se puede atender dicha situación:

- Minimizar la demanda insatisfecha;
- Minimizar el tiempo de operación;
- Minimizar el número de muertes.

Varios autores han tratado el problema de transporte de víctimas de desastres naturales en conjunto con la distribución de ayuda.

Yi y Özdamar (2007) proponen un modelo para coordinar la transportación de productos del mayor número de centros de suministro a los centros de distribución en las áreas afectadas y el transporte de personas heridas de zonas afectadas a unidades de emergencias temporales y permanentes. El modelo tiene el objetivo de minimizar la insatisfacción de la demanda de mercancía y personas que requieren atención médica.

Yi y Kumar (2007) proponen un modelo dividido en dos fases para encarar este problema, el ruteo de vehículos y el envío multi-producto. El problema de ruteo se soluciona mediante el método heurístico Optimización por Colonia de Hormigas. En la primera fase se construyen caminos estocásticos para vehículos, bajo la dirección de rastros de feromona mientras que un programa de solución basada en el flujo de red se desarrolla en la segunda fase para la asignación entre los diferentes tipos de flujos de vehículos y mercancías.

Yuan y Wang (2009) comunican que la selección de caminos es uno de los problemas fundamentales en el manejo de logística de emergencia. Los autores presentan dos modelos, el objetivo del primer modelo es minimizar el costo de viaje y los objetivos del segundo modelo son minimizar el tiempo necesario para cumplir con los procesos de logística (minimizar el tiempo que requiere recorrer los arcos seleccionados) y minimizar la complejidad del camino (minimizar el número de arcos en el camino). El modelo toma en cuenta que el tiempo en cada arco en la situación de desastre no es constante debido al gran caos y congestiones que se generan en la zona de desastre. Para la solución se utiliza el método heurístico Optimización por Colonia de Hormigas.

Otros autores como Zhang, Wei y Den (2012) también han desarrollado modelos tomando en cuenta la variación de la velocidad en cada arco.

La Figura 2.1 muestra, en general, un panorama en el que se encuentra la I. de O. ante la respuesta para el desastre.

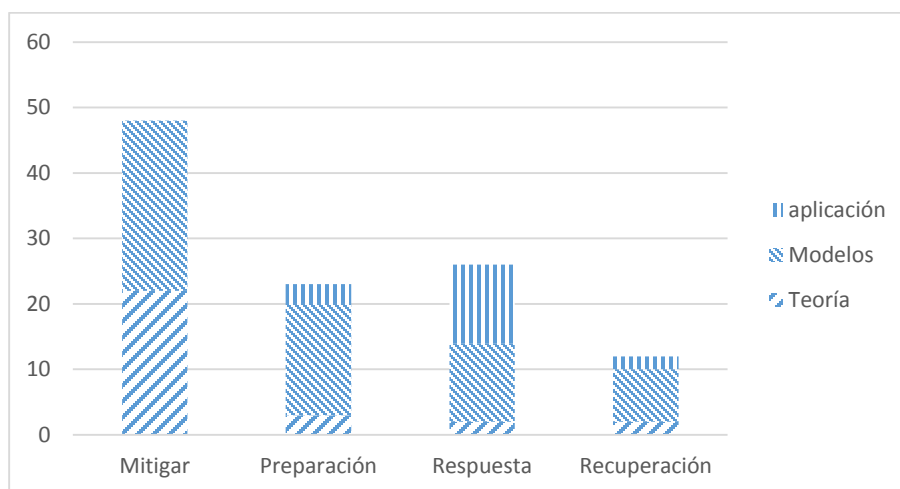


Figura 2.1. Panorama de la Investigación de Operaciones ante la respuesta al desastre. Obtenida de: Green & Altay (2005).

En la Figura 2.1 se puede observar que en el desarrollo de las actividades para la respuesta al desastre, aunque los trabajos son menos que para la Mitigación, el número de modelos desarrollados es prácticamente igual al número de modelos aplicados, lo que lleva a concluir que estos modelos para la respuesta al desastre son herramientas de mucha utilidad.

De la revisión de la literatura, es posible darse cuenta que la línea de investigación que por ahora ha desarrollado avances para el transporte de víctimas es la *logística de emergencia* dentro de la cual se encuentra la presente investigación.

Esta investigación pretende aportar una alternativa de acción acerca de la situación de riesgo que podría vivir México experimentando otro terremoto.

Se presenta a continuación una tabla que resume la revisión bibliográfica para abordar el tema.

| # | Autor                    | Año  | Recurso  | Tema                                                                                  | Contenido                                                                                   | Objetivo                                                                          | Relación con el tema                                                     |
|---|--------------------------|------|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Najafi, M. <i>et al.</i> | 2012 | Artículo | Planeación en la fase de respuesta para la atención a heridos y distribución de ayuda | Desarrollo de un modelo multi-obj., multi-modo, multi-prod. y multi-periodo                 | Optimizar jerárquicamente: heridos, mercancías y número de Vehículos              | Ruteo de vehículos. Jerarquización de heridos, conocimiento del problema |
| 2 | Zhang <i>et al.</i>      | 2012 | Artículo | Selección de rutas                                                                    | Desarrollo de un modelo bio-inspirado que, iterando, va mejorando cada vez una ruta inicial | Determinar la ruta óptima                                                         | Optimización de rutas                                                    |
| 3 | Caunhye <i>et al.</i>    | 2011 | Artículo | Logística de Emergencia                                                               | Revisión de la Literatura que muestra los desarrollos en diferentes acciones.               | Resumir los desarrollos que ha realizado la I. de O. en situaciones de emergencia | Modelos propuestos que han solucionado problemas de este tipo            |
| 4 | Hosseini, <i>et al.</i>  | 2011 | Artículo | Transporte de víctimas de terremoto                                                   | Desarrollo de modelo de dos objetivos para disminuir tiempo de traslado                     | Minimizar el tiempo de "ida y regreso" de los vehículos.                          | Ruteo para el traslado de heridos con uso de puntos de reunión           |
| 5 | Yuan y Wang              | 2009 | Artículo | Selección de caminos (arcos)                                                          | Desarrollo del modelo de dos objetivos para seleccionar el camino óptimo                    | minimizar el tiempo en que se recorren los arcos                                  | Optimización de rutas, minimizando tiempo/distancia                      |
| 6 | Yi y Özdamar             | 2007 | Artículo | Envío de productos y transporte de víctimas                                           | Desarrollo y aplicación del modelo y presenta algoritmo de solución                         | Minimizar demanda insatisfecha                                                    | Enfoque de maximizar el servicio                                         |



| #  | Autor                      | Año  | Recurso  | Tema                                                                             | Contenido                                                                                 | Objetivo                                                                  | Relación con el tema                                      |
|----|----------------------------|------|----------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 7  | Yi y Kumar                 | 2007 | Artículo | Envío de productos y transporte de víctimas                                      | Desarrollo del modelo y empleo de M. Heurístico ACO                                       | Minimizar demanda insatisfecha                                            | Empleo de metaheurísticas                                 |
| 8  | Green III, W. & Altay, N., | 2006 | Artículo | Investigación de Operaciones en la gestión de las operaciones para los desastres | Revisión de los desarrollos de I. de O. en el área de logística de Emergencia             | Mostrar la situación de la I. de O. ante las situaciones de Desastres     | Conocimiento del tema y área de oportunidad               |
| 9  | Viswanath & Peeta          | 2003 | Artículo | Atender heridos y también distribuir las mercancías,                             | Desarrollo de un modelo que identifica rutas críticas para cubrir la demanda de mercancía | Minimizar el costo de las rutas y maximizar la cobertura de la mercancía. | Identificar las rutas críticas. Optimización de rutas     |
| 10 | Fiedrich, <i>et al.</i>    | 2000 | Artículo | Asignación de recursos de rescate a diferentes tareas                            | Consideraciones y Desarrollo del Modelo para asignar recursos humanos.                    | Minimizar pérdidas humanas                                                | Conocimiento del tema. Enfoque de asignación de recursos. |

Tabla 2.1: Revisión bibliográfica para el traslado de heridos. Elaboración propia con base en la bibliografía consultada.

### 2.1.1 Propuesta de solución

Después de haber realizado la revisión de literatura y haber profundizado en el problema, se propone el uso de un plan de acción para los hospitales, donde se aplique un modelo de cobertura y otro de ruta más corta para abordar el problema del transporte de víctimas de terremoto. Este plan considera hacer uso de los puntos de reunión (donde se pueden ubicar los heridos), los hospitales disponibles y la red de caminos transitables que describen las distancias de viaje de un punto a otro, de

tal manera que se pretende minimizar la distancia recorrida por las ambulancias disponibles.

## 2.2 Definiciones, métodos y modelos

Durante mucho tiempo el ser humano ha resuelto sus problemas de diferentes maneras. Tiempo atrás se resolvían los problemas justo cuando ocurrían y con el paso del tiempo se ha evolucionado en esta forma de pensamiento, es por esto que la planeación ha tenido un papel muy importante en el desarrollo de la humanidad. La planeación ha clasificado la actuación ante los problemas en reactiva o interactiva. Esta clasificación tiene que ver con la perspectiva con la que se enfrenta un problema.

La manera reactiva, como su nombre lo dice, tiene que ver con la reacción ante un problema, esto es, cuando aparece un problema se toman acciones inmediatas para atacarlo.

La manera interactiva tiene que ver con tomar el control, es decir, adelantarse al futuro y tomar medidas para atacar un problema incluso antes de que aparezca. Esta actuación interactiva implica un estudio previo de las posibles situaciones y busca obtener los mejores resultados para los afectados y la consecución de los más bajos niveles de daños causados por el problema.

Cada vez que se piensa en tener un plan de actuación ante algún problema futuro, se piensa de manera preventiva. Ésta es una actividad que se realiza cotidianamente desde el ámbito personal hasta los niveles colectivos como grupos sociales en las comunidades, grupos laborales o también en la planeación de infraestructura.

Cuando previamente al surgimiento del problema se desarrolla una serie de procedimientos o de actividades a llevar a cabo con el fin común de dar solución al mismo, se dice que se desarrolla un plan o una estrategia.

A continuación se describirán algunos términos de relevancia en el trabajo con la finalidad de esclarecer su significado e interpretación en este trabajo.

### 2.2.1 Estrategia

Una estrategia se define como un plan que especifica una serie de actividades que tienen como fin la consecución de un objetivo determinado. Las estrategias se han utilizado en muchos ámbitos pero el ámbito militar es el que ha desarrollado muchas

estrategias con la finalidad primera de derrotar al enemigo. En la actualidad, las estrategias se utilizan en muchas áreas, no sólo en la militar.

La mayoría de las estrategias son fruto de la experiencia y la necesidad ante la solución de problemas. Los gobiernos de muchos países han desarrollado una gran cantidad de estrategias para combatir distintos problemas que sus poblaciones han tenido que enfrentar.

Se han encontrado estrategias para combatir la pobreza, el desempleo, para distribución de víveres, para combatir la delincuencia, promover la educación, combatir el hambre, promover la salud, etc., y muchas más que se utilizan como marcos de acción ante varias situaciones.

En general, el gobierno mexicano ha desarrollado muchas estrategias para enfrentar muchos problemas que aquejan a la nación, todas ellas con objetivos propios y actividades específicas, con la finalidad de actuar hacia una meta global de toda la estrategia.

Es importante mencionar, que la fortaleza de las estrategias radica en la intención de lograr el objetivo común y es por esto que las estrategias son de mucha utilidad cuando se requiere de la actuación de varios organismos.

Una estrategia ayuda a esclarecer y a definir las actividades que cada organismo debe realizar evitando así la actuación individual y la división de objetivos que, por separado, puede ser que no contribuyan a un objetivo global o de interés general para la mayoría de los usuarios o beneficiados.

Muchas estrategias son diseñadas, generalmente, con una visión preventiva ante situaciones que son inevitables y que representan algún riesgo o problema a encarar. Prevenir tiene la finalidad de apostar por una realidad mejor en el futuro, es por eso que aunque se avencinen situaciones que representen problemas, una estrategia se diseña para salir mejor librado de ellos, conociendo qué acciones se llevarán a cabo antes, durante y después que hayan acontecido situaciones problema.

En muchas entidades se han desarrollado planes de acción o estrategias ante situaciones de riesgo como puede ser la actuación ante un sismo o la actuación ante incendios, entre otras. Cada una detallando las acciones que se han de realizar de manera clara, y como se ha mencionado anteriormente, una estrategia debe ser entendible para quienes hacen o harán uso de ella con la finalidad de alcanzar un mismo objetivo general. Esto ha generado que en algunos casos se requieran capacitaciones, señalamientos, instructores y supervisores.

En todas las estrategias existen códigos o marcos de referencia que el usuario debe conocer, es decir, distinguir entre la ocurrencia de una y otra situación, el significado

de algún señalamiento, indicaciones a seguir si ocurre algún evento. Esto es debido a que una estrategia, generalmente, toma en cuenta a *priori* muchas de las situaciones que podrían presentarse y esto es un factor importante que fortalece su uso en el alcance de objetivos.

Es entonces, que cada estrategia puede tener sus propios códigos y señalamientos que sirvan a todos los usuarios para alcanzar en conjunto el objetivo general de la estrategia. En el caso de las estrategias que en su objetivo consideran el manejo de grupos masivos de personas, algunos conceptos y señalamientos que han sido de mucha utilidad son los siguientes:

- Indicaciones contra incendio;
- Indicaciones en caso de sismo;
- Puntos de reunión;
- Rutas de evacuación;
- Croquis de localización;
- Códigos de colores; entre otras.

Ya que en el desarrollo de esta investigación se propone el uso de una estrategia para el traslado de heridos en un caso de terremoto, un concepto que es de mucha utilidad es el de “punto de encuentro” o “punto de reunión”. Esto es evidente ya que no es únicamente un señalamiento, sino es una término que de conocerlo y atenderlo puede incluso salvar la vida de muchas personas en una circunstancia de peligro.

### 2.2.2 Puntos de reunión

Habitualmente se define al punto de reunión como un lugar predeterminado, definido, cercano y seguro de los efectos del siniestro donde se trasladan las personas para resguardarse o ser transportadas a un lugar más seguro.

Es debido a esta definición y uso, que el conocimiento y localización de ellos es de suma importancia en una situación de riesgo.

En general, para distinguir un punto de reunión se utilizan símbolos muy parecidos entre sí, lo que los hace de fácil ubicación en diferentes lugares y reconocibles por la población. Algunos de ellos son:



Figura 2.2. Simbología de puntos de reunión. Obtenida de: buscador de imágenes con la entrada “*simbología de puntos de reunión*”.

Los puntos de reunión deben poseer las siguientes características:

- Poseer un espacio adecuado para alojar a la población que acudirá a él;
- No se deben fijar cerca de un establecimiento en riesgo ya que éste debe quedar despejado para la intervención de bomberos, ambulancias y personal que acude en los casos de emergencia;
- Se debe evitar que las personas accedan a él cruzando calles o avenidas principales;
- Las plazas se consideran áreas adecuadas para ubicar un punto de reunión, por tanto, si hay alguna cercana de la zona de riesgo, ésta puede ser utilizada.

En general, los puntos de reunión deben ser ubicados en zonas no peligrosas, espaciosas, de fácil ubicación y señalización, donde no se interfiera la acción de rescatistas o personal de apoyo.

Los puntos de reunión han resultado ser de gran utilidad pues representan un zona segura donde pueden permanecer las personas esperando que pase la contingencia o personas que requieren ser atendidas. Cabe mencionar, que estos puntos deben ser ubicados y reconocidos por las personas que requieren atención y aquellos quienes pueden brindar apoyo.

El uso de puntos de reunión agiliza las acciones que llevan a cabo ambulancias, bomberos, elementos de seguridad, etc., ya que son puntos definidos y establecidos para que el acceso a ellos sea de manera sencilla, a fin de no entorpecer otras operaciones como puede ser: evacuaciones, estabilización de estructuras, etc.

Como se ha establecido en el objetivo de esta investigación, se planteará una estrategia para el traslado de víctimas de terremoto y se hará uso de los puntos de reunión en la zona. Si no existen, habrá que ubicar nuevos puntos en la zona de estudio de acuerdo con las características mencionadas anteriormente.

Después de ubicar o definir los puntos de reunión en la zona, se utilizarán herramientas de la investigación de operaciones para proponer una manera en que pueden actuar las ambulancias de los hospitales en zonas urbanas para atender a las víctimas de terremoto, esto de acuerdo con la revisión de la literatura realizada y con el estudio del problema. De esta manera es posible señalar los resultados que se esperan de estos modelos. Las herramientas que se utilizarán son dos modelos, un modelo de cobertura de conjuntos y uno de ruta más corta, de tal manera que al resolver el modelo de cobertura de conjuntos se asegure que todos los puntos de reunión recibirán atención médica desde por lo menos un hospital y al resolver el modelo de ruta más corta se obtendrán las rutas más cortas desde cada hospital a sus puntos de reunión asignados.

### 2.2.3 Problema de cobertura de conjuntos

El problema de cobertura de conjuntos (*SCP*, por sus siglas en inglés) es un problema de optimización combinatoria que se puede formular como un problema de programación entera binaria donde dado un número de puntos  $n$  se desea dar servicio a cada uno de ellos por medio de un número de servidores  $m$  pero el servicio que ofrecen estos servidores se traslapa, esto es, un servidor puede atender a más de un punto. El objetivo de este problema es determinar el conjunto mínimo de servidores con el que se puede atender a todos puntos.

De estos puntos y servidores se conoce la información relativa que indica qué punto puede ser atendido por los servidores disponibles, es decir se conoce una matriz de incidencia  $a_{ij}$  donde:

$a_{ij} = 1$  si el punto  $j$  puede ser atendido por el servidor  $i$  y 0 en caso contrario, donde  $i=1,2,\dots,m$  y  $j=1,2,\dots,n$ .

Con este problema es posible determinar los puntos que son atendidos por cada servidor, de manera que se dé cobertura a todos los puntos que requieren ser atendidos.

El problema de cobertura de conjuntos, forma parte de la lista de los problemas NP-completos. Es debido a esto, que una solución mediante métodos exactos no se considera factible cuando el problema es demasiado grande. Cuando esto sucede se requiere el uso de otras técnicas como las heurísticas o las metaheurísticas.

Para la solución del SCP, de problemas no mayores a los 200 servidores y 2,000 servicios, se han desarrollado algoritmos de solución óptima basados principalmente en el método *Branch and Bound* (Itaim, 2005).

Este problema ha sido aplicado en la instalación de servicios, estrategias de mercadotecnia, creación de grupos y otros más que tienen que ver con la creación de conjuntos sujetos a condiciones de pertenencia de tal manera que se satisfagan los servicios.

El SCP se puede modelar como un problema de programación entera binaria.

#### 2.2.4 Formulación de programación entera binaria del problema de cobertura de conjuntos.

En programación entera el problema de cobertura puede modelarse de la siguiente manera:

Sea:

$x_{ij} = 1$  si se instala un servidor para atender a uno o más clientes para satisfacer la cobertura y 0 en cualquier otro caso.

$$\text{minimizar } Z = C_{ij}x_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq 1 \quad \forall j$$

$$x_{ij} = 0, 1 \quad \forall i, j$$

Donde  $a_{ij}$  es una matriz de ceros y unos que brinda la información sobre qué servidor es capaz de atender a un cliente satisfaciendo las restricciones del problema. Si el servidor puede atender al cliente el coeficiente  $a$  es 1.

Ya que este problema es NP-completo, se ha trabajado para obtener soluciones cercanas a la óptima mediante heurísticas como Recocido Simulado o Algoritmos Genéticos.

### 2.2.5 Problema de ruta más corta

El problema de ruta más corta es estudiado por la teoría de redes dentro del campo de la investigación de operaciones, encontrar la ruta más corta entre un par de puntos de una red es un problema que tiene muchas aplicaciones.

Para ejemplificar el problema de la ruta más corta puede pensarse en una persona que necesita llegar a una ciudad destino, considerando que para llegar a ella es necesario que, en su trayecto, visite otras ciudades, de tal manera que al llegar al destino final se hayan visitado un grupo de ciudades y se haya recorrido la menor de todas las posibles distancias.

Este problema se ha desarrollado para varias aplicaciones como: encontrar la ruta más rápida entre dos puntos, redes eléctricas, telecomunicaciones, transporte, diseño de rutas, planeación de inventarios, etc.

Es así como se han desarrollado algoritmos de solución exactos y eficientes que permiten obtener el resultado óptimo de cada problema.

Algunos algoritmos para la solución del problema de ruta más corta son los desarrollados por:

- Dijkstra;
- Floyd y Warshall;
- Moore.

Una característica especial del algoritmo desarrollado por Floyd es que al final se pueden obtener las rutas más cortas entre cada par de nodos. Este hecho es particularmente interesante para esta investigación ya que se requiere conocer la ruta más corta entre un centro de atención médica a cualquier punto de reunión que le haya sido asignado para brindar atención médica dentro de una zona establecida.

### 2.2.6 Algoritmo de Floyd para el problema de ruta más corta.

El propósito de este algoritmo es obtener las rutas más cortas entre todo par de nodos en una red con  $n$  número de nodos. Este algoritmo se aplica a redes que admiten cualquier costo en los arcos, se requiere tener una numeración de los nodos en la red y se utilizará una matriz  $\mathbf{D}$  de dimensión  $n$  para almacenar los costos o distancias entre todo par de nodos. Si el costo no existe se le asigna un costo infinito (un costo muy grande). Asociada a la matriz  $\mathbf{D}$  se requiere de una matriz  $\mathbf{A}$ , la cual indica la secuencia de nodos para ir de un nodo a otro. En la matriz



A inicial se propone que se puede acceder a cada nodo directamente, lo cual es falso para los arcos con valor infinito pues algunas rutas podrían requerir nodos intermedios. Es por esto que esta matriz inicia con sus elementos  $a_{ij} = i$ .

A continuación se da una descripción del algoritmo de ruta más corta de Floyd (Flores de la Mota, 1999)

Paso 1:

Construir la matriz  $D$  de dimensión  $n$  con los elementos  $D_{ij}$  iniciales que son los costos de los arcos existentes, a los no existentes asociarles un valor muy grande ( $\infty$ ). Esta matriz irá cambiando en cada iteración.

Paso 2:

Sea  $k$  el número de iteraciones, para  $k = 1$  hasta  $n$ , hacer:

$$D_{ij} = \min (D_{ij}, D_{ik} + D_{kj})$$

Si  $D_{ij}$  de la iteración actual es diferente a  $D_{ij}$  de la iteración anterior, entonces en la casilla  $i, j$  de la matriz  $A$  se deberá actualizar con el valor de  $k$ .

Paso 3:

1.- Si  $D_{ij} < 0$  para alguna  $i$ , terminar el algoritmo ya que existe un circuito negativo y no se encontrará una solución.

2.- Si  $D_{ij} \geq 0$  para toda  $i$  y  $k < n$ , regresar al paso 2.

3.- Si  $D_{ij} \geq 0$  para toda  $i$  y  $k = n$ , terminar.  $D_{ij}$  es la distancia del camino más corto de  $i$  a  $j$ .

Para la recuperación de las rutas se requiere de la matriz  $A$  final, la cual se fue modificando con las  $k$  iteraciones, donde el elemento  $a_{ij}$  de esta matriz es el predecesor del nodo  $j$  en la ruta más corta entre  $i$  y  $j$

Al final de la iteración  $k = n$  se tienen se concluye con una matriz  $D$  con elementos  $D_{ij}$  los cuales representan la longitud de la ruta más corta entre los nodos  $i$  y  $j$ .

De acuerdo con la propuesta establecida en esta investigación, se ha requerido el uso de distintas herramientas y conceptos descritos anteriormente con la única

finalidad de alcanzar los objetivos propuestos en este trabajo. A continuación se describe la metodología que se utilizó para lograrlo.

### 2.3 Estrategia de investigación

Para realizar esta investigación cuyo resultado es un plan de acción se siguieron los siguientes pasos:

#### 1. Delimitación del problema

En esta etapa se acotó el tema de investigación, logrando establecer una problemática y el problema específico a abordar, esto es, de las grandes consecuencias que trae un desastre natural de este tipo, se ha tomado un problema en específico, el traslado de heridos. Esto se logró mostrando razones que motivan y dan valor al presente estudio que a su vez lo justifican y se realizó un análisis de viabilidad y de las deficiencias. En esta parte se estableció un objetivo definido y adicionalmente se establecieron objetivos específicos que ayudaron a realizar el trabajo de investigación.

Esta delimitación incluyó tomar conocimiento de acciones que ya han sido implementadas por el gobierno mexicano, considerando en dónde se podía mejorar.

#### 2. Revisión de la literatura

En esta etapa se recabó información de utilidad para sustentar la investigación: revisando los avances que existen en el tema, los autores que han escrito o publicado sobre esa problemática o problema, identificando cuáles son los enfoques con los que se ha abordado el problema y si no se ha realizado antes una investigación igual.

Con esta revisión fue posible realizar una propuesta de acciones para combatir el problema específico.

#### 3. Intervención mediante Investigación de Operaciones.

En esta etapa y con las acciones propuestas definidas, se puso en marcha la formulación y adaptación de los modelos a utilizar, para este paso fue indispensable la revisión de la literatura ya que habiendo revisado los trabajos, se obtuvo mayor conocimiento del tema, lo que permitió abordar el problema por medio de la

implementación, adaptación o desarrollo de los modelos propuestos que son capaces de ajustarse a las necesidades del problema, recordando que no se debe adaptar la situación al modelo sino realizar un modelo a la medida del problema.

Con los modelos propuestos, es necesario hacerles verificaciones que nos den confiabilidad de usar el modelo, que sirve para lo que se propuso y que los resultados son útiles.

Los modelos matemáticos como trabajo de investigación, se complementan cuando son probados, por lo que se realizaron pruebas de los modelos en un caso de aplicación.

#### 4. Realizar un caso de aplicación

En esta etapa es donde se obtuvieron resultados de la investigación pues se probaron los modelos propuestos y se revisó si éstos fueron formulados correctamente. También se definió una zona de estudio con base en información sísmica y análisis de riesgo.

#### 5. Obtener resultados y conclusiones

Con los resultados obtenidos de los modelos se comprobó que son de utilidad para resolver el problema planteado y por lo tanto se pueden escribir las conclusiones sobre ello.

Esta estrategia de investigación da certeza de realizar un trabajo de investigación basado en la metodología de la Investigación de Operaciones y de acuerdo con el problema establecido y las herramientas obtenidas de la revisión de la literatura, en el siguiente capítulo se desarrolla un plan de acción para disminuir el tiempo de traslado de víctimas de terremoto.

### 3. Plan de acción

El apego al uso de una estrategia, garantiza que el objetivo propuesto en ella ha de cumplirse en la mayor medida posible. En este capítulo, se muestra la manera en que se abordarán los problemas que surgen en el traslado de heridos para finalizar con la redacción formal del plan de acción para ello.

Para solucionar el problema planteado, es de utilidad conocer los elementos que interactúan en el sistema, sus relaciones y sus efectos, para eso se han plasmado las causas del problema en el sistema.

#### 3.1 Modelo conceptual

A continuación, se muestra un diagrama de Ishikawa donde se muestran los principales elementos y variables que intervienen en el sistema estudiado y, que a su vez, se pretenden manejar de una manera ordenada para lograr los objetivos del presente trabajo.

Recordemos que el objetivo de este trabajo es proponer un plan de acción a hospitales en zonas urbanas para el traslado de heridos después de un terremoto optimizando el uso de ambulancias.

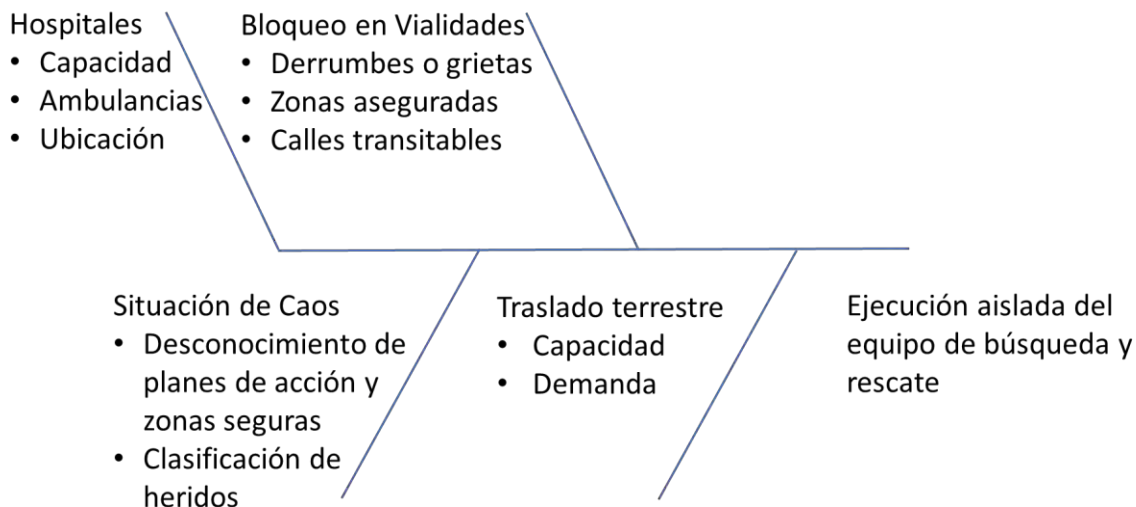


Figura 3.1. Diagrama de *Ishikawa* para el problema de traslado de heridos.  
Elaboración propia.

Debido a la estructura del problema, se ha propuesto, en el presente trabajo, que éste sea abordado como un problema de ruta más corta para cada hospital.

De acuerdo con el diagrama de Ishikawa, es evidente que un factor determinante para lograr el objetivo son los centros de atención. Para este problema, los centros de atención son representados por hospitales que pueden prestar el servicio de atención médica, debido a esto, se debe definir qué hospitales pueden ser contemplados en la posible solución del problema.

Para cada hospital, es necesario definir su ubicación y si cuentan con sala de emergencia, traslado de heridos y atención médica al público en general en el caso de un sismo de gran magnitud. Teniendo esto en cuenta, es necesario distinguir a los hospitales que sirven para contribuir con el objetivo y averiguar su capacidad.

La ubicación de cada hospital resulta crucial en la solución del problema ya que de esta manera es posible reconocer si es factible la cobertura en cuanto al servicio de atención médica hacia los puntos de reunión. También de esta manera se pretende lograr una solución integral del problema, optimizando el tiempo de traslado proponiendo un radio de atención, es decir, evitar que un hospital atienda zonas demasiado lejanas a éste.

El radio de atención, o de cobertura, está definido como la máxima distancia que puede recorrer una ambulancia para recoger heridos de algún punto de encuentro desde un hospital origen. Con esto, es posible reconocer los puntos de encuentro que podría atender cada hospital, recordemos que otros aspectos como la capacidad del hospital juegan un papel muy importante en el problema. En el presente trabajo se manejará el supuesto de que la capacidad de los hospitales es suficiente para atender a los puntos de reunión.

La capacidad de los centros de atención está definida por el número de pacientes que puede atender. Por ser una medida de emergencia, se debe tomar en cuenta que la capacidad, en este caso, se refiere a la capacidad que tiene el hospital para atender a los heridos a causa del terremoto sin tomar en cuenta a los pacientes que ya están siendo atendidos por otras razones.

Como se ha mencionado anteriormente, los terremotos son fenómenos naturales impredecibles que dañan profundamente a la población y a la infraestructura de una nación. El número de personas dañadas es también impredecible y es precisamente este número el que determina la demanda del problema. Como el sistema es un sistema inexistente, una alternativa para estimar la demanda de atención médica en los puntos de reunión sería utilizar datos obtenidos del último terremoto experimentado, el de 1985.

Debido a las consecuencias de un terremoto, las personas sufren lesiones que deben ser atendidas según lo críticas que sean con respecto a la preservación de la vida del herido. En este problema se pretende dar atención a las personas que resulten heridas debido a un terremoto con la finalidad de mejorar el desempeño de los recursos que brindan atención médica como ambulancias y hospitales, de manera que esto infiera en la disminución del número de decesos por falta de atención médica. Para asegurar que el número de muertes sea mínimo se seguirá la lógica de atender con preferencia a los heridos que sean catalogados como de mayor gravedad y después atender a los de lesiones menores. Para lograr esto, se podría catalogar a los heridos de acuerdo con sus lesiones y la urgencia de su estado de manera que los de mayor gravedad sean atendidos primero, tanto por los primeros auxilios que reciban en la ambulancia como por la atención especializada en el hospital asignado.

Para agilizar las maniobras del equipo de rescate (ambulancias) se propone como necesaria la ubicación de puntos de reunión, donde las ambulancias puedan dirigirse directamente y los heridos puedan ser recogidos justo en ese punto. Las ambulancias se dirigen y únicamente dan servicio a heridos del punto de reunión, esto también es un supuesto del problema.

Los daños que se generan a la infraestructura de la zona son determinantes para el acceso de los servicios de atención médica. Los derrumbes, grietas en el suelo y la estabilización de zonas consideradas como peligrosas representan obstáculos para acceder a los puntos de reunión. Esto se puede traducir en un bloqueo de calles y avenidas debido a que es imposible transitarlas por material de construcción esparcido en las calles, grietas en el pavimento y por dar prioridad a la seguridad de la demás infraestructura y personas por medio de acordonamiento de industrias, gasolineras, plantas eléctricas o zonas que se consideren, en este caso, de alto riesgo y que sea mejor guardar una debida distancia.

Por otra parte, de la totalidad de las calles y avenidas de la zona, después de un terremoto quedan calles y avenidas aparentemente sin daños graves que pueden ser transitadas por las ambulancias y automóviles en general. Es necesario tomar en cuenta estas avenidas disponibles ya que son parte de la solución del problema. De las calles transitables es de donde se obtendrán las posibles rutas que han de seguir las ambulancias hacia los puntos de reunión para brindar la atención médica.

Las calles y avenidas juegan un papel muy importante por ser el medio físico por el que una ambulancia puede llegar de un lugar a otro, es por esto que conocer sus características permitirá dar una buena solución al problema; por ejemplo: tomar en cuenta el sentido del tránsito, el número de carriles, qué tan transitada es, etc. Un supuesto en el problema es que las calles pueden ser transitadas en ambos sentidos debido a la urgencia de la situación y por tratarse de ambulancias.

Es debido a la disponibilidad y bloqueo de calles que es necesario diseñar las rutas para las ambulancias que les permita dirigirse de manera rápida al punto de reunión y regresar al hospital. Para lograr este objetivo, se pretende optimizar (minimizar) el tiempo que hará la ambulancia en su recorrido por medio del diseño de rutas.

El número de rutas por hospital depende de los puntos de reunión asignados a éste. También se debe tomar en cuenta el número de ambulancias con las que cuenta el hospital.

Cada ambulancia tiene características, por ahora la que más interesa es la capacidad que tienen ya que esto definirá el número de veces que la ambulancia debe recorrer el ciclo para dar atención al número de heridos en un punto de reunión.

De acuerdo con el diagrama de influencia mostrado, es evidente la necesidad de establecer los supuestos y parámetros necesarios para trabajar el problema mediante las técnicas propuestas. En principio se trata de un problema de ruta más corta, donde se deberán obtener los datos de los hospitales, su capacidad, ambulancias disponibles y su capacidad, la ubicación de los puntos de reunión, establecer la demanda de atención médica (número de heridos), definir las posibles calles bloqueadas y disponibles de la zona de estudio.

Para abordar el problema específico de esta investigación se ha propuesto dividirlo en dos fases:

**FASE I (cobertura):** esta fase del problema implica determinar qué hospitales darán atención a los puntos de reunión, con esto se pretende evitar la construcción de un megamodelo y trabajar el problema de manera más efectiva.

En esta primera fase se utilizará un modelo de cobertura que asocie cada punto de reunión con al menos un hospital. Esta fase tiene como finalidad que en la estrategia propuesta se conozca con anticipación el conjunto de puntos que corresponden a cada hospital.

**FASE II (ruta):** Esta segunda fase consta de la solución de un problema de ruta más corta que identifique la ruta de menor distancia que puede recorrer una ambulancia que parte desde un hospital hasta un punto de reunión asignado en la fase anterior.

Cabe mencionar que los resultados de la primera fase son indispensables para la solución de la segunda fase.

La solución del modelo de ruta más corta se interpreta como los arcos (calles) que deberá transitar la ambulancia desde el hospital de partida hasta el punto de reunión y que representan la ruta con distancia mínima.

## 3.2 Propuesta del plan de acción

Recordemos que esta investigación propone un plan de acción que puede ser utilizado en una situación de terremoto, pero su objetivo es trasladar de forma efectiva a los heridos, víctimas de los efectos de un sismo de gran magnitud y daños. Es por esto, que la investigación en general implica una actuación proactiva ante una circunstancia en el futuro.

Después de haber realizado un diagrama de influencia o de causas (Figura 3.1), ahora se conocen conceptos de gran importancia en el sistema y cómo influyen en otros. Es así que se ha podido establecer que una parte del problema puede trabajarse en la etapa preventiva del desastre, esta porción del problema se conoce como primera fase.

### 3.2.1 Fase I

La primera fase del plan implica dar solución al problema de cobertura. Para esto se deberán seguir los siguientes pasos.

1.- Considerar los hospitales en la zona de riesgo que seguramente pondrán sus recursos al servicio del bienestar social en una situación de desastre provocada por un terremoto. En su mayoría, estos hospitales pueden ser identificados por ser parte de la red de hospitales que brindan servicio debido al gobierno del estado. De estos hospitales, será necesario indagar en sus especificaciones de servicios y capacidad, es decir, investigar si existe servicio de urgencias, si cuentan con ambulancias y con cuántas, si puede ingresar cualquier herido, etc.

2.- Definir los puntos de reunión. Estos puntos de reunión deben ser ubicados de acuerdo con los criterios que definen a un punto de reunión seguro, ante situaciones de riesgo. Estos puntos se pueden ubicar en plazas públicas, instalaciones públicas como escuelas, edificaciones gubernamentales, parques, etc., previa y debidamente señalizados que se encuentran dentro de la zona de riesgo. Lo anterior con la finalidad de que la población tenga conocimiento oportuno sobre hacia dónde dirigirse en una situación de peligro como un terremoto, así como para el personal de apoyo que colabora con la búsqueda y rescate de personas heridas.

3.- Resolver el problema de cobertura para determinar los puntos de reunión que serán atendidos por cada hospital. El modelo de cobertura deberá ser formulado con los datos de los hospitales, ambulancias y puntos de reunión obtenidos anteriormente.



La solución del modelo de cobertura marca el fin de la primera fase del problema. Hasta este punto, es posible trabajar con el problema incluso mucho tiempo antes de que un terremoto se presente. Este hecho es congruente con el uso de las estrategias preventivas, las cuales realizan acciones y procesos a fin de mitigar las consecuencias de un hecho que, se sabe, está por ocurrir.

En general, la estrategia propuesta en la primera fase se acopla al siguiente diagrama:

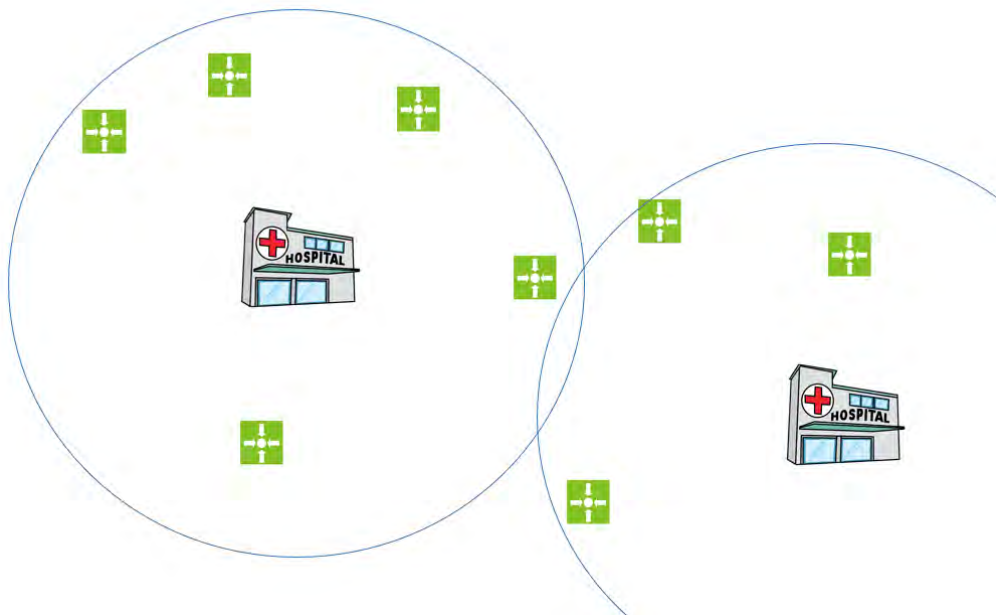


Figura 3.2. Fase I del plan de acción. Establecer los puntos de reunión que son atendidos por cada uno de los hospitales. Elaboración propia.

1. Definir y actualizar la red de hospitales que intervienen;
2. Definir los puntos de reunión disponibles en la zona; y
3. Con base en lo anterior, elaborar un manejo de la capacidad de servicio para atender la demanda en los puntos de reunión.

Al finalizar la fase uno, se entiende que se ha determinado la manera en que cada punto de reunión es atendido por al menos un hospital. Las salidas del modelo de cobertura (resultados) son indispensables para la iniciar la segunda fase del plan, por esto, siempre se deberá solucionar la fase I en primer lugar.

Como se mencionó anteriormente, la finalidad de implementar un plan de acción ante una situación de desastre es mitigar los daños y consecuencias que una

situación de este tipo deja a su paso y es en esta clase de situaciones donde la población juega un papel muy importante ya que es la misma población quien sufre los efectos de un percance natural y es a quien se le debe brindar ayuda.

Por esto mismo, se plantea como un supuesto del plan, que la población debe estar previamente enterada de que existe una estrategia para la situación de terremoto y del protocolo que se debe seguir, así como de la ubicación y señalización de los lugares relevantes como hospitales disponibles y puntos de reunión que contribuyen al objetivo de este plan.

### 3.2.2. Fase II

La segunda fase del plan consiste en la solución del problema de ruta más corta desde el hospital hacia cada uno de los puntos de reunión que le correspondan.

Para esta fase es posible darle solución antes de que se presente un terremoto con la finalidad de tener rutas preliminares. Pero ¿qué sucede cuando estas rutas preliminares se tornan intransitables debido a efectos del terremoto a la hora de la actuación?

Esta fase puede ser solucionada en constantes ocasiones, de acuerdo con los reportes de los bloqueos en las calles y es aquí donde se justifica el uso de un algoritmo de ruta más corta para el diseño de rutas para las ambulancias que deben atender a la población ubicada en los puntos de reunión.

La segunda fase de este plan genera las rutas que deberán seguir las ambulancias para dar atención a la población herida ubicada en el punto de reunión por medio de la selección del camino que, al recorrerlo, representa el de menor distancia de traslado.

### 3.3 Definición de puntos de reunión

Como se mencionó en el capítulo 2, los puntos de reunión en una situación de desastre, contribuyen a salvaguardar la vida de las personas damnificadas así como a la actuación eficiente de los cuerpos y brigadas de ayuda y rescate. Es debido a eso, que los puntos de reunión deben estar dotados de atributos que los identifiquen como un lugar seguro y de fácil acceso para los heridos y para los que brindan ayuda. Es conveniente que los puntos de reunión que contribuyan al objetivo de

este plan cuenten con estos atributos y sean de fácil ubicación y reconocimiento por la población que potencialmente podría requerirlos.

Para esto, se recomienda que las autoridades que hagan uso de este plan de acción realicen campañas informativas sobre el mismo plan, que respondan preguntas como: ¿qué son y para qué sirven los puntos de encuentro? ¿Cómo los pueden identificar? ¿Cuál es el punto de reunión más cercano a su ubicación actual? ¿A qué punto deben dirigirse en caso de tener la capacidad? etc.

Para la ejecución efectiva de este plan, los puntos de reunión y su correcto uso son cruciales para una actuación rápida de los cuerpos de rescate. Como supuesto del plan, se ha establecido que las ambulancias se dirijan únicamente a los puntos de reunión y no a cada uno de los inmuebles donde se registre algún herido.

Estos puntos de reunión pueden ser ubicados en plazas públicas, parques o escuelas ya que son establecimientos conocidos, que en general cuentan con espacios abiertos y son de fácil reconocimiento para la población local. El uso de esta estrategia propone a estos lugares como puntos de reunión potenciales.

### 3.4 Problema de cobertura

Habiendo definido los puntos de reunión que sirven para contribuir con este plan, se procede a determinar los puntos a los cuales los hospitales enviarán sus ambulancias de manera que todos los puntos de reunión sean atendidos por lo menos por un hospital.

Se ha propuesto solucionar este problema con un modelo de cobertura de conjuntos de la siguiente manera:

Se propone minimizar la distancia recorrida por las ambulancias que se dirijan a los puntos de reunión desde cada hospital. La restricción que se incluye en el modelo está dada por el tiempo de viaje desde el hospital a cada uno de los puntos de reunión. Este tiempo puede ser calculado mediante el uso de sistemas de información geográfica. Con esta restricción se establece, a la vez, un radio de atención o de cobertura para cada hospital.

De acuerdo con esto, el modelo de cobertura de conjuntos queda establecido como se indica a continuación.

$X_{ij} = [0,1]$ ; 0 si el hospital  $i$  no se encarga de atender al punto  $j$  y 1 si el hospital  $i$  atiende al punto de reunión  $j$ .

$$\text{minimizar } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^m a_{ij} x_{ij} \geq 1; j = 1 \dots n$$

Donde el coeficiente  $a_{ij}$  toma los valores  $[0,1]$  si el punto  $j$  no satisface las restricciones para ser atendido por el hospital  $i$ , y 0 si el punto  $j$  satisface las restricciones para ser atendido por el hospital  $i$ .

Para determinar los coeficientes  $a_{ij}$ , es necesario identificar los tiempos de viaje asociados desde cada hospital hacia cualquier punto de reunión en una matriz donde se reconoce qué puntos satisfacen la restricción de tiempo de viaje máximo impuesta por el hospital.

Lo anterior del modelo asegura que todos los puntos de reunión son cubiertos por al menos un hospital, sin embargo, debemos asegurar que la demanda se distribuya prudentemente entre los hospitales. Para lograr esto, es posible realizar una variación al modelo clásico de cobertura de conjuntos (SCP). La variación propuesta es agregar una restricción que indique cuantos puntos puede atender cada hospital de acuerdo con su capacidad.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = H_i; i = 1 \dots m$$

$$x_{ij} = [0,1] \quad \forall i, j$$

La constante  $H$  es el número máximo de puntos que puede atender cada hospital.

El problema de cobertura de conjuntos es un problema de optimización combinatoria que puede ser formulado mediante programación lineal entera y se puede obtener su solución por métodos exactos y métodos heurísticos dependiendo del tamaño del problema (número de conjuntos).

### 3.5 Problema de ruta más corta

En una situación de desastre es necesario tener en cuenta que habrán calles que se encuentren bloqueadas por derrumbes, trabajos o por seguridad, debido a esto, es justificable el uso de un modelo de ruta más corta que pueda resolverse en múltiples ocasiones si es que las rutas se van modificando de acuerdo con la disponibilidad de tránsito.

Después de determinar qué hospital atiende a cada punto de reunión, entonces es posible solucionar el problema de ruta más corta en una red de distancias real tomada de un mapa de la zona de riesgo. Para este paso se ha propuesto utilizar un sistema de información geográfica del cual se pueden obtener las distancias en las calles disponibles para el tránsito de ambulancias. Esta red se obtiene como se muestra a continuación.

1. Se obtiene el mapa de la zona.

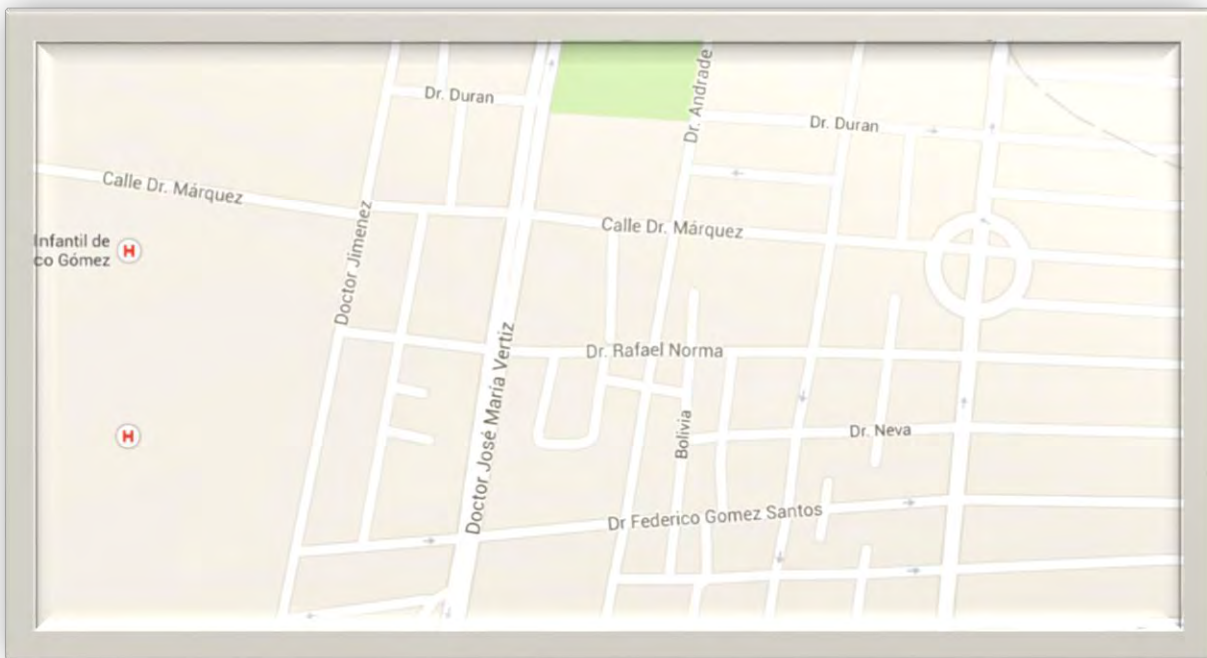


Figura 3.3. Ejemplo de obtención de mapa de la zona. Obtenida de *Google Maps*.

2. A partir del mapa y con el sistema de información geográfica se obtienen las distancias de cada arco esto es la distancia entre cada cruce de dos o más calles que es donde se deberá tomar la decisión de en qué dirección ir. Para obtener estas distancias se utilizó la herramienta *Google Earth*.

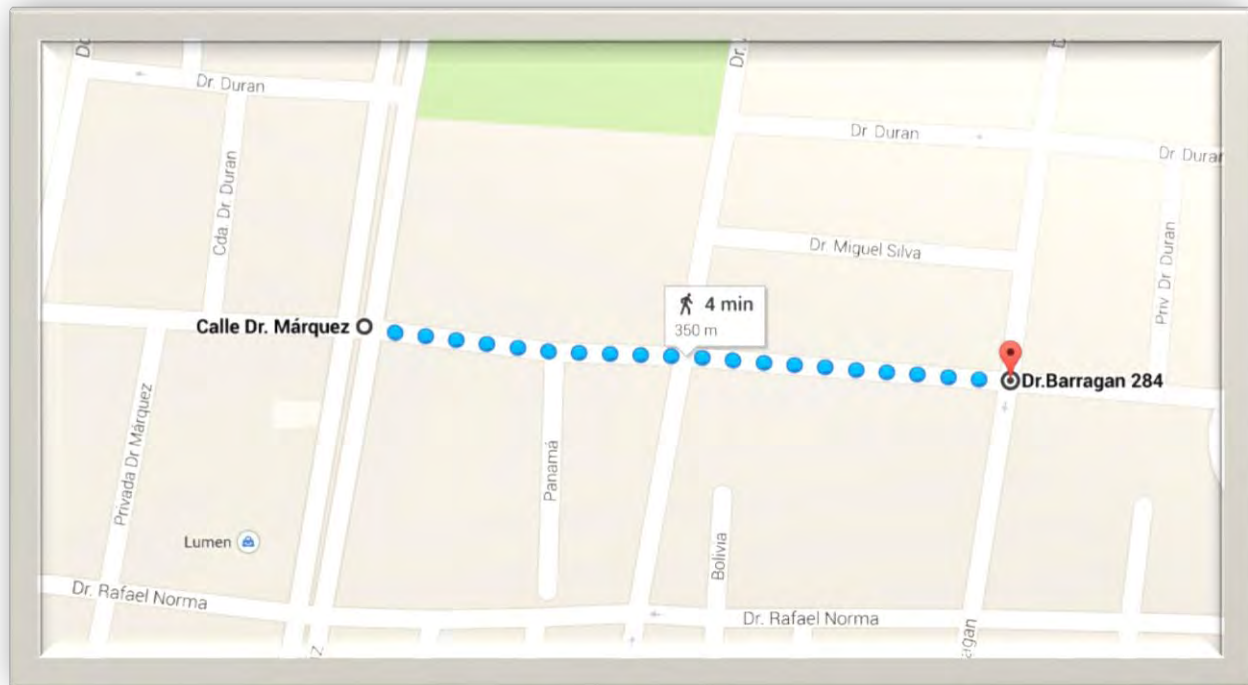


Figura 3.4. Ejemplo de obtención de distancias. Obtenida de Google Maps.

3. Se procede a construir la red de distancias de la zona ubicando a los hospitales y los puntos de reunión en algún nodo. Recordemos que toda distancia entre dos puntos representa un arco a transitar.

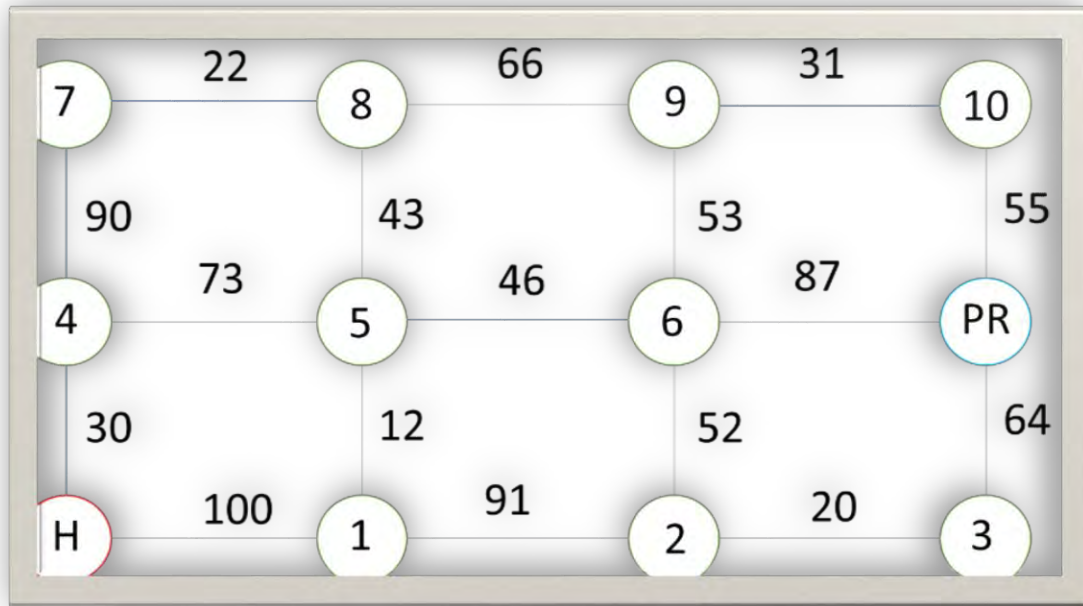


Figura 3.5. Ejemplo de red de distancias. Elaboración propia.

La construcción de esta red es de importancia para solucionar el problema de ruta más corta ya que, como se mencionó anteriormente, este problema es un problema clásico de la teoría de redes.

Al concluir la red de distancias de la zona se puede resolver el problema de ruta más corta mediante el algoritmo de Floyd, propuesto anteriormente, para obtener las rutas de menor distancia desde un hospital a cada uno de los puntos de reunión que en la fase anterior hayan sido seleccionados para atender por cada hospital. Este algoritmo puede ser traducido en un código para un programa que solucione el problema de ruta más corta entre dos puntos. En el anexo del presente trabajo se encuentra el código del programa que se utilizó en el caso de aplicación.

Como se mencionó anteriormente, en el capítulo 1 de éste trabajo, uno de los problemas que se distingue del “Plan Sismo” es que no se encuentran acciones operativas explícitas para la respuesta ante un terremoto, es por eso que a continuación se concentran las acciones propuestas en este capítulo 3, en el siguiente plan de acción para brindar atención médica a personas heridas por causa de un terremoto.

### 3.6 Plan de acción en marcha.

Es de suma importancia mencionar que se deberá hacer un refuerzo de conocimientos a la población involucrada sobre la existencia del plan continuamente así como de sus elementos, pues aún con lo valiosas y potentes que pueden ser las herramientas que han sido propuestas, no tendrán mucho resultado si las personas afectadas no tienen conocimiento de en qué pueden contribuir para alcanzar los objetivos de este plan.

0. Hacer del conocimiento a la población del plan y sus elementos, esto es, la operación del plan de manera general y ubicación de los puntos de reunión, de tal manera que la población comprenda que, en caso de terremoto, el plan se activará y comenzarán las operaciones que están descritas en él. De esta manera la población entenderá que las entidades que brindan atención médica trabajarán para hacerles llegar la atención a los lugares establecidos en el plan. De manera similar y proactivamente, los hospitales saben que, en caso de terremoto, deberán dirigir sus recursos (ambulancias) hacia lugares específicos (primera fase del plan). Esta acción da control a la operación y evita las acciones aisladas que generan más caos.
  
1. Se activa el plan: Ocurrido el terremoto, se ponen a disposición todos los recursos nacionales que contribuyen a salvaguardar la vida de la población afectada (plan sismo). Para efectos de este plan, los hospitales en este momento saben con anticipación a donde enviar sus ambulancias y estas mismas son encargadas de traer información al hospital (cantidad de personas acumuladas, actualización de calles bloqueadas o calles transitables, etc.). Simultáneamente, la población es parte del plan y, dado el evento, entiende que para que éste funcione se requiere de su mayor colaboración, en medida de lo posible, para hacer llegar a los heridos a los puntos de reunión y proceder con la ejecución de la segunda fase del plan.

Plan de acción para brindar atención médica a personas heridas en caso de terremoto.

Para la población en general.

Se comparte el conocimiento de las acciones en caso de terremoto.

0. Tengo conocimiento de que existe un plan para recibir atención médica en caso de que ocurra un terremoto. Conozco las acciones principales que son:



- Conservar la calma en todo momento;
- Si estoy en condiciones de ayudar puedo hacerlo, si me encuentro alterado me retiro hacia una zona segura;
- Las personas en condiciones de ayudar en conjunto y bajo la dirección del equipo de Rescate contribuimos a hacer llegar a las personas heridas a una zona segura donde, de acuerdo con el plan, llegará la atención médica.

Ocurre un terremoto, se activa el plan.

1. Conservar la calma;
2. Dirigirse a una zona segura, puntos de reunión;
3. Ubicar a los equipos de rescate;
4. Si se está en condiciones, ayudar a los heridos a dirigirse al punto de reunión más cercano;
5. Esperar, la ayuda médica está por llegar.

Para los hospitales que prestan sus servicios ante situaciones de desastre.

0. Tenemos conocimiento del plan, de que, en caso de sismo, debemos dirigir nuestras ambulancias hacia puntos de reunión establecidos y que conocemos la ruta más corta hacia ese destino. Los puntos de reunión son de fácil acceso y la población tiene conocimiento de que ahí llegará la ayuda en ambulancias.

Ocurre un terremoto, se activa el plan.

1. Ponemos a disposición los recursos con los que contamos (plan sismo). Nos preparamos para brindar atención médica de emergencia a un grupo grande de heridos;
2. Distribuimos médicos de ayuda a los puntos de reunión que ayuden a clasificar a los heridos y brindar la primera ayuda a los heridos críticos y no críticos;
3. Las ambulancias se dirigen hacia los puntos de reunión establecidos previamente por la ruta más corta inicial. Los operadores de las ambulancias son quienes actualizan información de las rutas, esto es, indicar si está libre la ruta o si hay bloqueos y se debe modificar;
4. Los operadores de ambulancia recorren la ruta repetidamente hasta trasladar a todos los heridos que requieren hospitalización al hospital de origen.

## 4. Caso de Aplicación

### 4.1 Zona de estudio

En el capítulo 1 describimos la situación sísmica en la que se centra México y, en particular, la Ciudad de México, también se describió el porqué de los riesgos sísmicos en las diferentes zonas de la ciudad. Es por esto que para aplicar el plan propuesto se ha seleccionado una zona considerada de alto riesgo donde seguramente tendrá utilidad un plan de acción para un evento de sismo. Se ha seleccionado la Delegación Cuauhtémoc debido a su alto riesgo sísmico.

Para poder definir la red que se utilizará para este problema, es necesario que sean analizados diferentes zonas y elementos de riesgo que caracterizan a la delegación Cuauhtémoc. Se establecen así tres zonas de interés:

- Zonas críticas de la delegación;
- Hospitales;
- Puntos de reunión.

Estos aspectos han sido considerados de acuerdo con la información pública disponible y se han tomado como situaciones actuales para el presente caso de aplicación.

#### 4.1.1 Zonas críticas de la delegación Cuauhtémoc

Identificar las zonas críticas implica determinar las colonias que pueden ser afectadas severamente por un sismo. En este caso de estudio, se tomarán mapas de riesgo sísmico para determinar zonas de interés.

De acuerdo con los *Mapas de peligros geológicos*<sup>1</sup> elaborados por el Servicio Geológico Metropolitano, se definen las zonas cuyo riesgo de derrumbe es crítico dentro de la Delegación Cuauhtémoc. Se tomarán en cuenta las zonas con un riesgo alto de derrumbe (amarillo) y las zonas con un riesgo muy alto (rojo).

---

<sup>1</sup>[http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/mapas\\_sgm/mapas\\_sgm2.html](http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/mapas_sgm/mapas_sgm2.html). 2014-05-16, 12:30.

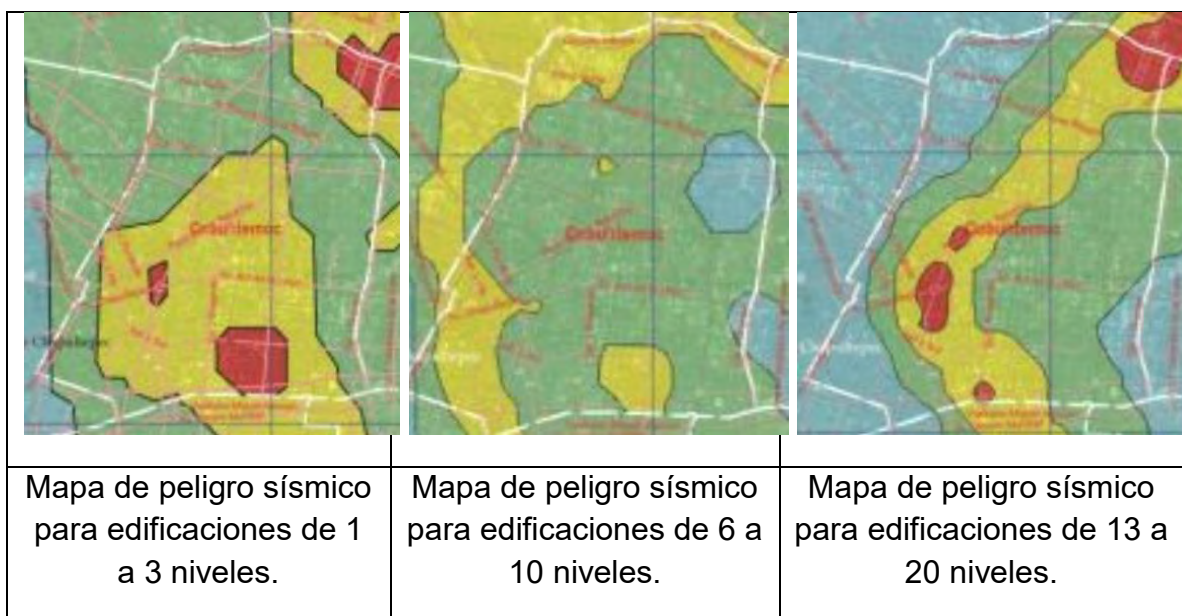


Figura 4.1. Mapa de peligros sísmicos para la delegación Cuauhtémoc.  
 Obtenida de: [http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/mapas\\_sgm/mapas\\_sgm2.html](http://www.proteccioncivil.df.gob.mx/mapas_sgm/mapas_sgm2.html).  
 2014-05-16

De acuerdo con la información anterior, se identifican las áreas de la Delegación Cuauhtémoc cuya distribución de aceleraciones máximas de suelo podrían provocar desastres de consideración. A continuación, se mencionan las colonias que están dentro de cada zona, en donde la zona clasificada de color rojo, representa alto riesgo de catástrofe y la zona amarilla, un riesgo menor pero aún de consideración:

| Zona Amarilla           | Zona Roja   |
|-------------------------|-------------|
| Condesa                 | Algarín     |
| Roma Sur                | Doctores    |
| Cuauhtémoc              | Juárez      |
| Atlampa                 | Roma Norte  |
| Santa María Rivera      | Valle Gómez |
| Hipódromo Condesa       | Maza        |
| Santa María Insurgentes | Obrera      |

Tabla 4.1 Colonias dentro de cada zona de riesgo. Elaboración propia con base en los datos obtenidos en los mapas de riesgo.

Una vez clasificadas las colonias de acuerdo con la zona de riesgo donde se ubican, se procede a delimitar la región de la delegación que será de interés para el proyecto:



Figura 4.2. Colonias delimitadas dentro de la Delegación Cuauhtémoc. En la imagen se muestran los tres hospitales que se encuentran dentro de la zona de interés (H). Obtenida de Google Earth.

Se ha establecido, para esta investigación, trabajar con la colonia Doctores por ser una de las más afectadas de acuerdo con los mapas de riesgo mostrados anteriormente.



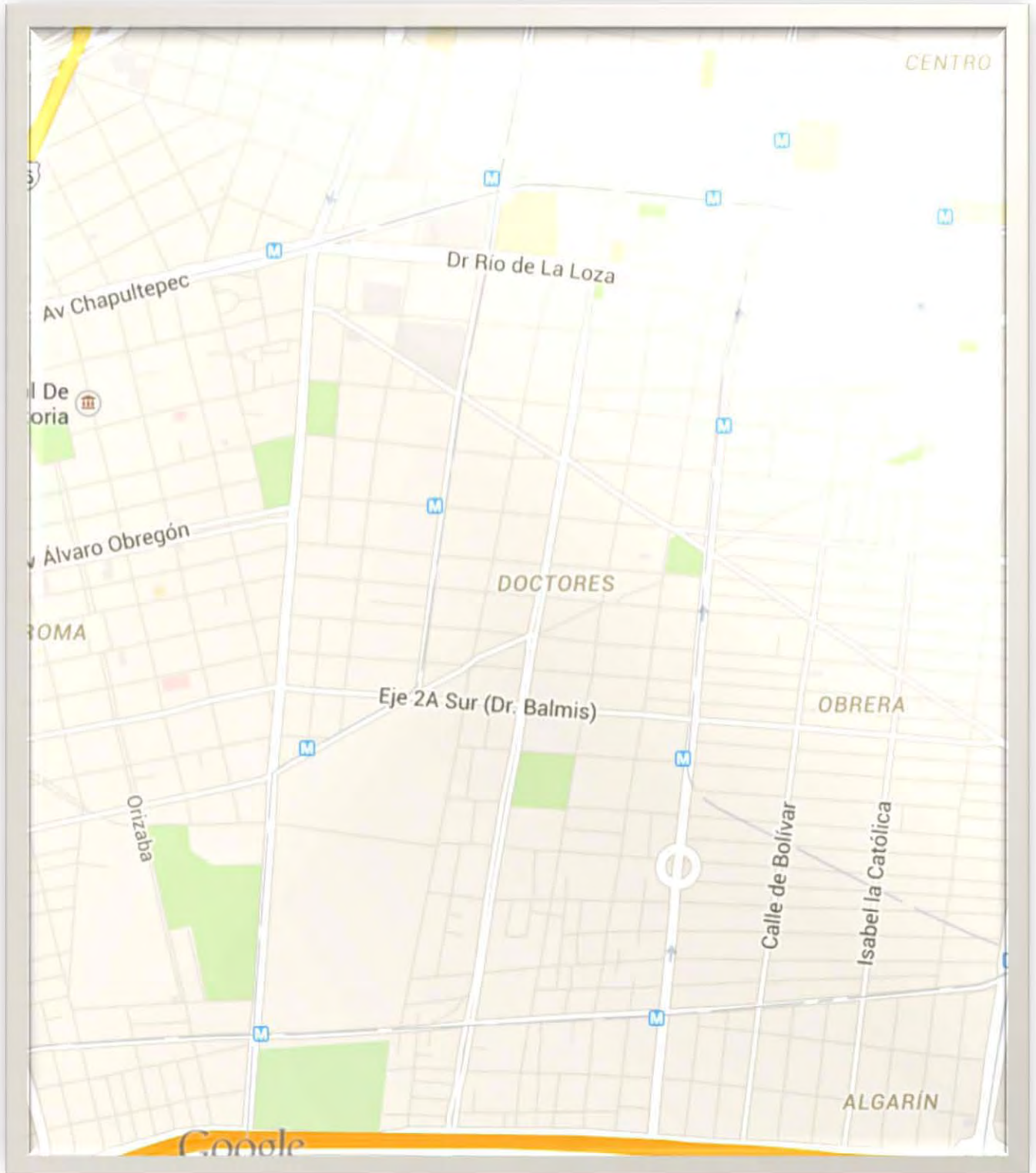


Figura 4.3. Colonia Doctores. Obtenida de GoogleMaps.

#### 4.1.2 Ubicación de hospitales

La Delegación Cuauhtémoc cuenta con una gran cantidad de hospitales públicos y privados; sin embargo, para la construcción de la red, los hospitales que se tomaron en cuenta son los siguientes:

| <b>Hospital</b>                                         | <b>Dirección</b>                                          |
|---------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| <b>1. Centro de Salud T-III Dr. Atanasio Garza Ríos</b> | Dr. José María Vertiz S/N, Doctores, Cuauhtémoc, 06720    |
| <b>2. Hospital General de México</b>                    | Eje 2ª Sur (Dr. Balmis) 148 Doctores, 1 Cuauhtémoc, 0726. |
| <b>3. Centro Médico Nacional Siglo XXI</b>              | Av. Cuauhtémoc, 330, Col. Doctores.                       |

Tabla 4.2. Hospitales seleccionados. Elaboración propia con base en información pública.

#### 4.1.3 Ubicación de puntos de reunión

Los puntos de reunión se definieron bajo los criterios establecidos para esta estrategia descritos en el capítulo anterior. Éstos son los siguientes:

| <b>Punto de reunión</b>                    | <b>Dirección (cruces)</b>                             |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <b>1.- Jardín "Artes gráficas"</b>         | <b>Dr. José María Vertiz y Dr. Arce</b>               |
| <b>2.- Jardín "Dr. Ignacio Chávez"</b>     | <b>Cuauhtémoc y Dr. J. Navarro</b>                    |
| <b>3.- Plaza "Adolfo López Mateos"</b>     | <b>Dr. José María Vertiz y Av. Dr. Río de la Loza</b> |
| <b>4.- Tribunal Superior de justicia</b>   | <b>Av. Niños Héroes y Dr. Lavista</b>                 |
| <b>5.- Parque "Lázaro Cárdenas"</b>        | <b>Dr. Erazo y Eje Central</b>                        |
| <b>6.- Cruce Dr. Márquez y eje central</b> | <b>Dr. Márquez y Eje central</b>                      |
| <b>7.- Registro civil "Arcos de Belén"</b> | <b>Av. Arcos de Belén y Dr. Andrade</b>               |

Tabla 4.3. Puntos de reunión seleccionados. Elaboración propia con base en información pública y vistas de GoogleMaps.

En la siguiente figura, se muestra la zona de estudio, la ubicación de los puntos de reunión y la ubicación de los tres hospitales a considerar en el caso de aplicación.



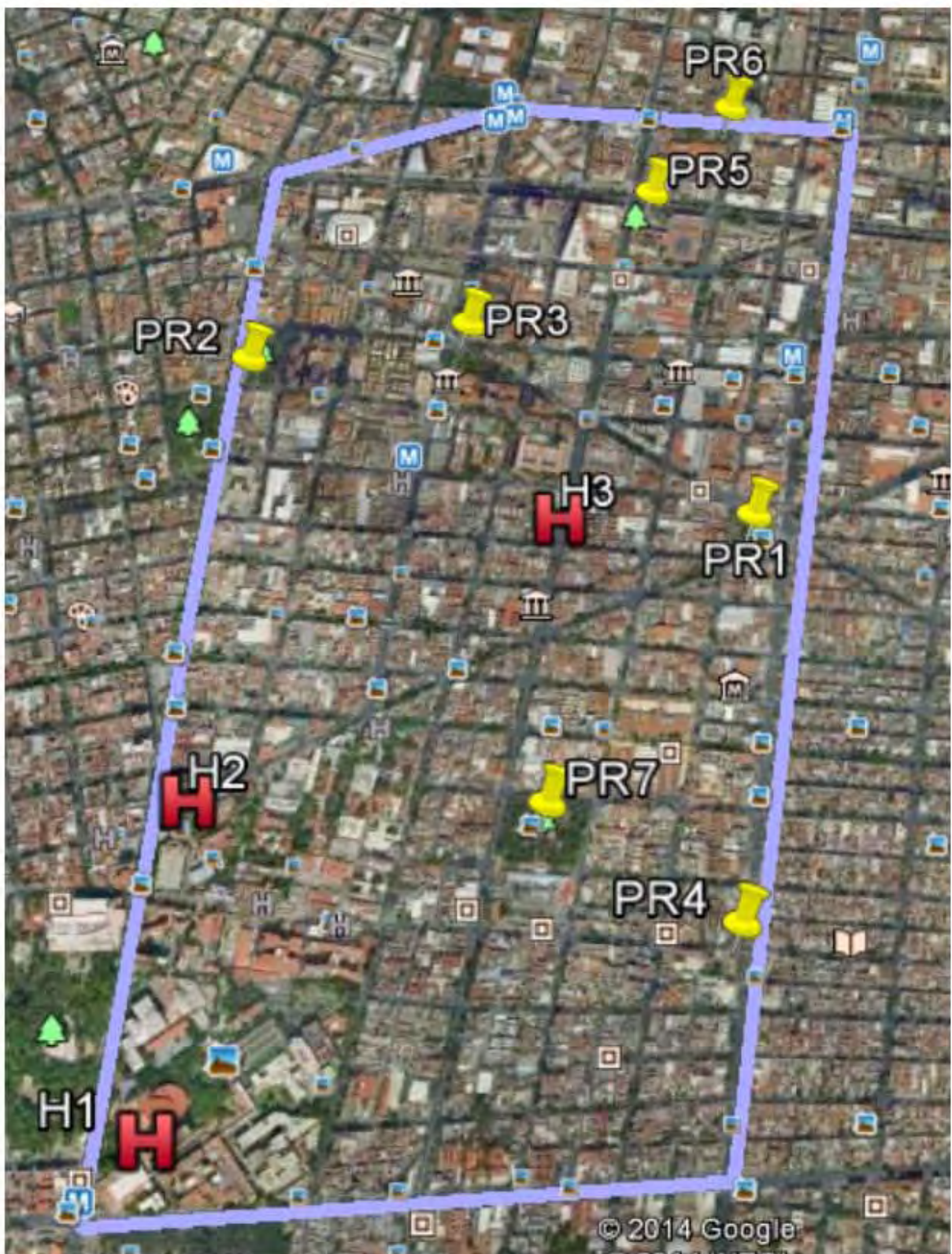


Figura 4.4. Delimitación de la zona. Obtenida de Google Earth.

Para la formulación de los modelos, fue necesario realizar la numeración de todos los nodos, los cuales corresponden a todo cruce entre mínimo dos calles. Estos nodos están ubicados donde se debe tomar una decisión, ésta puede ser: girar a la derecha, continuar en la misma dirección o girar a la izquierda. Dicha decisión estará marcada por el nodo siguiente en la ruta.

#### 4.1.4 Supuestos del modelo

Dentro de la investigación, se consideran algunos supuestos del sistema en estudio. Los supuestos que se tomaron en cuenta son:

- La capacidad de los hospitales se considera suficiente para atender a los puntos de reunión asignados y de acuerdo con el tamaño de sus instalaciones da un estimado de a cuántos de los puntos puede atender cada hospital;
- Se eliminaron arcos donde se ubicaban gasolineras que podrían poner en peligro el traslado de heridos;
- Se restringen calles cerradas, callejones y pasos peatonales; y
- No se toma en cuenta el sentido de las calles ya que en una situación de desastre se daría prioridad al paso de ambulancias. De esta forma los arcos de la red son no dirigidos.
- No se considera la capacidad de las ambulancias pues en el trabajo se busca la ruta con distancia mínima entre un hospital y un punto de reunión.

#### 4.2 Modelo de cobertura.

Una vez determinada la red de hospitales y de puntos de reunión que describe el problema, es de vital importancia que se establezcan cuáles son los puntos de reunión que serán atendidos por cada uno de los hospitales. Por lo que se construye un modelo de cobertura considerando los tiempos de viaje entre cada punto de reunión y cada hospital. En la siguiente tabla se muestran dichos tiempos de viaje asociados, en minutos. Estos tiempos fueron calculados con la herramienta GoogleMaps solicitando el tiempo de ir de un punto a otro, en este caso, de cada hospital a cada punto de reunión.



|                    | Hospital<br>1 | Hospital<br>2 | Hospital<br>3 |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| Punto de Reunión 1 | 7             | 5             | 1             |
| Punto de Reunión 2 | 5             | 3             | 4             |
| Punto de Reunión 3 | 7             | 4             | 2             |
| Punto de Reunión 4 | 5             | 5             | 5             |
| Punto de Reunión 5 | 8             | 6             | 4             |
| Punto de Reunión 6 | 11            | 8             | 5             |
| Punto de Reunión 7 | 4             | 3             | 3             |

Tabla 4.4. Tiempos de viaje entre puntos de reunión y hospitales en minutos.  
Elaboración propia, tiempos calculados con GoogleMaps.

Con los datos anteriores podemos proceder a la construcción del modelo de programación entera binaria que describe el problema de cobertura de conjuntos para el caso de estudio. La tabla 4.4 es también la matriz A para el modelo de cobertura de conjuntos planteado. El modelo matemático del problema de cobertura de conjuntos correspondiente al caso queda formulado como sigue:

Variables de decisión:

$X_{ij} = 1$  si el hospital  $i$  atiende al punto de reunión  $j$  y 0 en cualquier otro caso

Función Objetivo  $Min = 7*X_{11} + 5*X_{12} + 7*X_{13} + 5*X_{14} + 8*X_{15} + 11*X_{16} + 4*X_{17} + 5*X_{21} + 3*X_{22} + 4*X_{23} + 5*X_{24} + 6*X_{25} + 8*X_{26} + 3*X_{27} + 1*X_{31} + 4*X_{32} + 2*X_{33} + 5*X_{34} + 4*X_{35} + 5*X_{36} + 3*X_{37};$

Sujeto a:

$$X_{11} + X_{21} + X_{31} \geq 1;$$

$$X_{12} + X_{22} + X_{32} \geq 1;$$

$$X_{13} + X_{23} + X_{33} \geq 1;$$

$$X_{14} + X_{24} + X_{34} \geq 1;$$

$$X_{25} + X_{35} \geq 1;$$

$$X_{36} \geq 1;$$

$$X_{17} + X_{27} + X_{37} \geq 1;$$

$$X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} = 3;$$

$$X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} = 2;$$

$$X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} + X_{36} + X_{37} = 2;$$

$$X_{ij} = 0,1 \forall i, j$$

Donde el primer grupo de restricciones establecen qué hospitales son capaces de atender a los puntos de reunión considerados. Recordando lo explicado en el capítulo anterior, estas restricciones quedan definidas con la matriz  $A$ , esta matriz indica qué punto puede ser cubierto por al menos un hospital y eso está definido por la condición que el tiempo de viaje entre hospitales y puntos de reunión no puede ser mayor a 15 min. Esta condición se definió de acuerdo con información encontrada sobre el tiempo máximo en que una persona herida de gravedad debe recibir atención médica para que ésta tenga mayores posibilidades de salvarse. El tiempo en que se debe atender a una persona grave es de 1 hora, por lo que en el presente trabajo se propone un tiempo de viaje no mayor a 15 min (ida y vuelta de la ambulancia). El segundo grupo de restricciones establecen el número de puntos de reunión que atiende cada hospital, esto se determina con una variable  $H_i$ , la cual se ha establecido de acuerdo con el tamaño y capacidad de cada hospital, por ejemplo el hospital más grande puede atender a 3 puntos de reunión y los demás por ser de menor tamaño, menor capacidad, atienden a 2 puntos cada uno. La última restricción indica que si la variable de decisión toma el valor de 1, entonces el punto de reunión  $j$  es atendido por el hospital  $i$  y vale 0 en cualquier otro caso.

#### 4.3 Resultados del modelo de cobertura.

Los resultados de este modelo son los siguientes (solucionado mediante software para la optimización LINGO vr 10):

$$X_{12}, X_{14}, X_{17} = 1$$

$$X_{23}, X_{25} = 1$$

$$X_{31}, X_{36} = 1$$

Lo que se traduce como:

- El hospital 1 atiende a los puntos de reunión 2, 4 y 7;
- El hospital 2 atiende a los puntos de reunión 3 y 5; y
- El hospital 3 atiende a los puntos de reunión 1 y 6.

Con estos datos es posible diseñar las rutas desde los hospitales hacia los puntos de reunión. Cabe mencionar, que esta manera de administrar los hospitales es información muy valiosa para la solución del problema completo y es por esto que se plantea, como alternativa, dar solución a esta primera fase antes de que ocurra un terremoto. Esto implica que cuando se presente un terremoto, los hospitales ya

tendrán el conocimiento de a qué puntos de reunión debe dirigirse y únicamente se encargarán de diseñar las rutas de acuerdo con la red de avenidas y calles disponibles.

#### 4.4 Modelo de ruta más corta.

En el capítulo 3 se ha explicado la manera en que se construye la red de distancias para la zona de estudio, por lo que se ha procedido a calcular cada una de la distancias entre cada par de nodos conectados y al final se obtuvo una red que se representó en una matriz de distancias de 173 nodos para iniciar con la solución de la segunda fase del problema y que se ha propuesto utilizar el algoritmo de Floyd para el cálculo de ruta más corta. Todos estos datos fueron calculados con Google Earth.

En la figura 4.5 se muestra como se numeró la zona de estudio para identificar cada cruce con cada nodo y asignarle un nodo a cada hospital y punto de reunión.

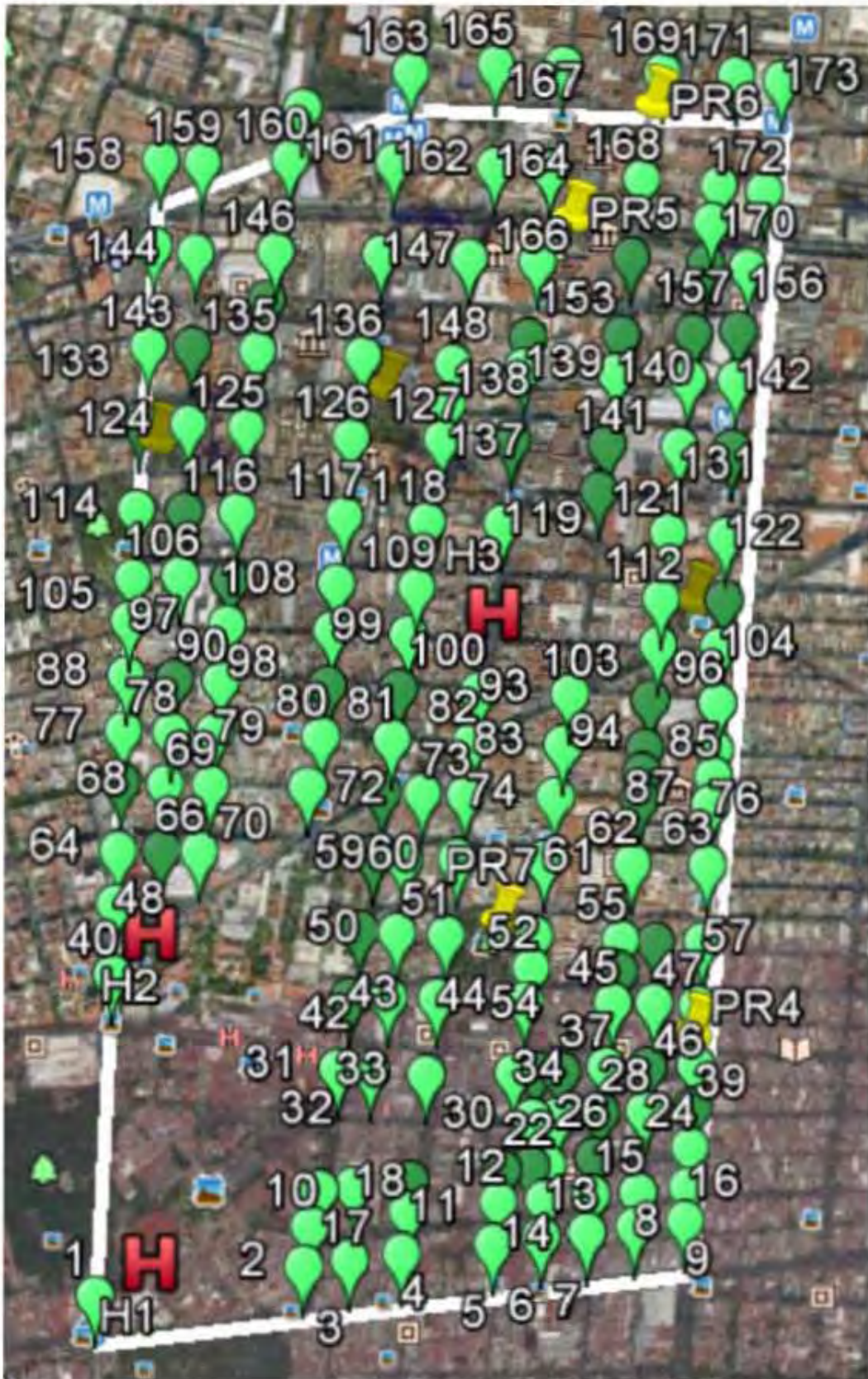


Figura 4.5. Numeración de nodos. Elaboración propia con GoogleEarth.

En la figura 4.6 se puede observar una porción de la matriz utilizada en el algoritmo.

|    | 1   | 2   | 3  | 4   | 5   | 6  | 7  | 8   | 9   | 10 | 11  | 12  | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18  | 19  | 20  | 21 | 22  | 23  | 24  | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36  |     |     |     |    |   |    |
|----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|---|----|
| 1  | 0   | 396 |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 2  | 396 | 0   | 86 |     |     |    |    |     |     | 71 |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 3  |     | 86  | 0  | 97  |     |    |    |     |     |    | 138 |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 4  |     |     | 97 | 0   | 170 |    |    |     |     |    |     | 82  |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 5  |     |     |    | 170 | 0   | 92 |    |     |     |    |     | 81  |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 6  |     |     |    |     | 92  | 0  | 84 |     |     |    |     |     | 66 |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 7  |     |     |    |     |     | 84 | 0  | 86  |     |    |     |     |    | 66 |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 8  |     |     |    |     |     |    | 86 | 0   | 100 |    |     |     |    |    | 61 |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 9  |     |     |    |     |     |    |    | 100 | 0   |    |     |     |    |    |    | 60 |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 10 |     |     | 71 |     |     |    |    |     |     |    | 0   | 180 |    |    |    |    |    | 67  |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 11 |     |     |    | 138 | 82  |    |    |     |     |    | 180 | 0   |    |    |    |    |    |     |     | 55  |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 12 |     |     |    |     | 81  |    |    |     |     |    |     | 0   | 87 |    |    |    |    |     |     | 58  |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 13 |     |     |    |     |     | 66 |    |     |     |    |     | 87  | 0  | 85 |    |    |    |     |     |     |    | 61  |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 14 |     |     |    |     |     |    | 66 |     |     |    |     |     | 85 | 0  | 88 |    |    |     |     |     |    |     | 61  |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 15 |     |     |    |     |     |    |    | 61  |     |    |     |     |    | 88 | 0  | 95 |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 16 |     |     |    |     |     |    |    |     | 60  |    |     |     |    |    | 95 | 0  |    |     |     |     |    |     |     | 74  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 17 |     |     |    |     |     |    |    |     |     | 67 |     |     |    |    |    |    | 0  | 66  |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 227 |     |     |     |    |   |    |
| 18 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    | 66 | 0   | 112 |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 219 |     |     |     |    |   |    |
| 19 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    | 55  |     |    |    |    |    |    | 112 | 0   | 177 |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     | 200 |     |     |    |   |    |
| 20 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     | 58  |    |    |    |    |    |     | 177 | 0   | 54 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     | 185 |     |    |   |    |
| 21 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     | 54  | 0   | 33 |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 88  |     |     |     |    |   |    |
| 22 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     | 61 |    |    |    |    |     |     | 33  | 0  | 84  |     |     |    | 84 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 23 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    | 61 |    |    |    |     |     |     | 84 | 0   | 185 |     |    |    | 82 |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 24 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    | 74 |    |     |     |     |    | 185 | 0   | 260 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 78  |     |     |     |    |   |    |
| 25 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     | 260 | 0   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 26 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     | 84  |    |    |    | 0  | 81 |    |    |    |    |    |    | 47  |     |     |     | 85 |   |    |
| 27 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    | 81 | 0  | 85 |    |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 28 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    | 85 | 0  | 92 |    |    |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 29 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    | 85 | 0  | 92 | 0  |    |    |    |     |     |     |     |    |   |    |
| 30 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     | 83  |     |    |   |    |
| 31 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     | 0   | 63  |     |    |   |    |
| 32 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | 63  | 0   | 105 |     |    |   |    |
| 33 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     | 105 | 0   | 163 |    |   |    |
| 34 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     | 163 | 0   | 43 |   |    |
| 35 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     | 83  |     | 43 | 0 | 49 |
| 36 |     |     |    |     |     |    |    |     |     |    |     |     |    |    |    |    |    |     |     |     |    |     |     |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |     | 85  |     | 49 | 0 |    |

Figura 4.6. Matriz de distancias entre cada par de nodos. Elaboración propia.

En la Figura 4.6 se pueden notar algunos aspectos antes mencionados. La matriz es simétrica, ya que como supuestos al modelo se ha propuesto que no influyan los sentidos en las calles (si es que existen), este aspecto facilita el uso del algoritmo ya que se puede trabajar con la matriz triangular superior o inferior y el número de operaciones se reduce a la mitad.

También se pueden observar espacios “en blanco” que son identificados como valores muy grandes, de hecho son valores indeterminados pues esos arcos no existen. Esto representa que no existe una conexión directa entre esos pares de nodos sino que será necesario el uso de nodos intermedios para disminuir esa distancia. El algoritmo de Floyd precisamente busca cambiar ese número muy grande inexistente por uno menor que sí sea posible, accediendo a él por medio de nodos intermedios.

En el algoritmo de Floyd, esta matriz de distancias tiene asociada otra matriz de secuencia con la misma dimensión, llamada matriz A, en la cual se tiene el registro



de cómo se llega de un nodo a otro. En la Figura 4.7 se muestra una porción de la matriz A inicial.

|    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 1  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 2  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 3  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 4  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 5  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 6  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 7  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 8  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 9  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 10 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 11 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 13 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 14 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 15 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 16 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 17 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 18 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 19 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 20 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 21 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 22 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 23 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 24 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 25 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 26 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 27 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 28 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 29 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 30 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 31 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 32 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 33 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 34 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 35 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 36 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |

Figura 4.7. Matriz de secuencias A inicial. Elaboración propia.

En esta matriz, inicialmente se considera que existe una conexión directa entre todo par de nodos y se utiliza de la siguiente manera. Si quisiera saber cómo llegar del nodo 4 al 19 basta con ubicar la casilla (4, 19) y observar que número está ahí. Como esta es la matriz inicial y se asume que hay conexión entre todo par de nodos, este número coincide con el nodo final. Esta matriz se va modificando conforme avanza el algoritmo, por lo que al final la solución existe y en algunos casos el número que se ubique en ciertas casillas nos dirá que nodo se visita antes del nodo destino. Este algoritmo se ha descrito en el capítulo dos.

Fue necesario elaborar un programa (ver Apéndice A) que ejecutara este algoritmo y así solucionar el problema que nos dé la ruta más corta desde un hospital hasta los puntos de reunión asignados a él. Es debido a la necesidad del problema, que se opta por programar el algoritmo que le da solución ya que se requiere una solución rápida y realizarlo “a mano” no contribuye al objetivo ni a una respuesta rápida.

Como se ha mencionado, el algoritmo de Floyd tiene la característica de calcular la ruta más corta entre todo par de nodos, en este caso, la solución del algoritmo queda plasmada en dos matrices. La Primer matriz de solución nos indica el costo o distancia de recorrer la ruta más corta desde un cruce a cualquier otro, por otro lado, la segunda matriz solución nos indica la manera en que se recorre esta ruta, es decir, si del nodo inicial al final se llega directamente o si existen nodos intermedios. A continuación, se muestran los hospitales y puntos de reunión asociados con el número de nodo correspondiente.

| <b>IDENTIFICADOR</b> | <b>NODO</b> |
|----------------------|-------------|
| <b>HOSPITAL 1</b>    | 1           |
| <b>HOSPITAL 2</b>    | 48          |
| <b>HOSPITAL 3</b>    | 110         |
| <b>PUNTO 1</b>       | 112         |
| <b>PUNTO 2</b>       | 123         |
| <b>PUNTO 3</b>       | 136         |
| <b>PUNTO 4</b>       | 47          |
| <b>PUNTO 5</b>       | 166         |
| <b>PUNTO 6</b>       | 169         |
| <b>PUNTO 7</b>       | 51          |

Tabla 4.5. Nodos correspondientes a hospitales y puntos de reunión.

Después de correr el programa que soluciona el algoritmo de Floyd, se obtuvo lo siguiente:

Recordemos que, en la primera fase del problema se dio solución al problema de cobertura y se definió qué puntos de reunión son atendidos por cada hospital en la zona de la siguiente manera:

- El hospital 1 (nodo 1) atiende a los puntos de reunión 2 (nodo 123), 4 (nodo 47) y 7 (nodo 51);
- El hospital 2 (nodo 48) atiende a los puntos de reunión 3 (nodo 136) y 5 (nodo 166); y
- El hospital 3 (nodo 110) atiende a los puntos de reunión 1 (nodo 112) y 6 (nodo 169).

Lo cual implica que nuestra solución para la ruta más corta debe expresarse como:

- La ruta más corta de ir del nodo 1 al nodo 123;
- La ruta más corta de ir del nodo 1 al nodo 47;
- La ruta más corta de ir del nodo 1 al nodo 51;
- La ruta más corta de ir del nodo 48 al nodo 136;
- La ruta más corta de ir del nodo 48 al nodo 166;
- La ruta más corta de ir del nodo 110 al nodo 112; y
- La ruta más corta de ir del nodo 110 al nodo 169.

#### 4.5 Resultados del modelo de ruta más corta.

La solución del problema mediante el algoritmo de Floyd arroja los siguientes resultados:

Las distancias mínimas entre los hospitales y los puntos de reunión son:

| Hospital | Nodo | Punto de reunión | Nodo | Distancia total en metros |
|----------|------|------------------|------|---------------------------|
| 1        | 1    | 2                | 123  | 1,646                     |
|          |      | 4                | 47   | 1,470                     |
|          |      | 7                | 51   | 1,142                     |
| 2        | 48   | 3                | 136  | 1,419                     |
|          |      | 5                | 166  | 2,020                     |
| 3        | 110  | 1                | 112  | 323                       |
|          |      | 6                | 169  | 1,173                     |

Tabla 4.6. Distancia recorrida por la ruta más corta entre hospitales y puntos de reunión.

Estas distancias fueron obtenidas de la matriz de distancias resultante, de la cual se muestra una porción en la Figura 4.8.



|    |      |     |     |     |     |     |     |      |      |     |     |     |     |     |      |
|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|    | 1    | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8    | 9    | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15   |
| 1  | 0    | 396 | 482 | 579 | 749 | 841 | 925 | 1011 | 1111 | 467 | 620 | 830 | 907 | 991 | 1072 |
| 2  | 396  | 0   | 86  | 183 | 353 | 445 | 529 | 615  | 715  | 71  | 224 | 434 | 511 | 595 | 676  |
| 3  | 482  | 86  | 0   | 97  | 267 | 359 | 443 | 529  | 629  | 157 | 138 | 348 | 425 | 509 | 590  |
| 4  | 579  | 183 | 97  | 0   | 170 | 262 | 346 | 432  | 532  | 254 | 82  | 251 | 328 | 412 | 493  |
| 5  | 749  | 353 | 267 | 170 | 0   | 92  | 176 | 262  | 362  | 424 | 252 | 81  | 158 | 242 | 323  |
| 6  | 841  | 445 | 359 | 262 | 92  | 0   | 84  | 170  | 270  | 516 | 344 | 153 | 66  | 150 | 231  |
| 7  | 925  | 529 | 443 | 346 | 176 | 84  | 0   | 86   | 186  | 600 | 428 | 237 | 150 | 66  | 147  |
| 8  | 1011 | 615 | 529 | 432 | 262 | 170 | 86  | 0    | 100  | 686 | 514 | 321 | 234 | 149 | 61   |
| 9  | 1111 | 715 | 629 | 532 | 362 | 270 | 186 | 100  | 0    | 786 | 614 | 415 | 328 | 243 | 155  |
| 10 | 467  | 71  | 157 | 254 | 424 | 516 | 600 | 686  | 786  | 0   | 180 | 470 | 557 | 642 | 730  |
| 11 | 620  | 224 | 138 | 82  | 252 | 344 | 428 | 514  | 614  | 180 | 0   | 290 | 377 | 462 | 550  |
| 12 | 830  | 434 | 348 | 251 | 81  | 153 | 237 | 321  | 415  | 470 | 290 | 0   | 87  | 172 | 260  |
| 13 | 907  | 511 | 425 | 328 | 158 | 66  | 150 | 234  | 328  | 557 | 377 | 87  | 0   | 85  | 173  |
| 14 | 991  | 595 | 509 | 412 | 242 | 150 | 66  | 149  | 243  | 642 | 462 | 172 | 85  | 0   | 88   |
| 15 | 1072 | 676 | 590 | 493 | 323 | 231 | 147 | 61   | 155  | 730 | 550 | 260 | 173 | 88  | 0    |
| 16 | 1167 | 771 | 685 | 588 | 418 | 326 | 242 | 156  | 60   | 825 | 645 | 355 | 268 | 183 | 95   |
| 17 | 534  | 138 | 224 | 315 | 485 | 566 | 650 | 734  | 828  | 67  | 233 | 413 | 500 | 585 | 673  |
| 18 | 600  | 204 | 290 | 249 | 419 | 500 | 584 | 668  | 762  | 133 | 167 | 347 | 434 | 519 | 607  |
| 19 | 675  | 279 | 193 | 137 | 307 | 388 | 472 | 556  | 650  | 235 | 55  | 235 | 322 | 407 | 495  |
| 20 | 852  | 456 | 370 | 309 | 139 | 211 | 295 | 379  | 473  | 412 | 232 | 58  | 145 | 230 | 318  |
| 21 | 906  | 510 | 424 | 363 | 193 | 160 | 244 | 327  | 421  | 466 | 286 | 112 | 94  | 178 | 266  |

Figura 4.8. Matriz de distancias resultante. Elaboración propia.

En la Figura 4.8 puede notarse que todo par de nodos tiene una distancia asociada, esto representa que es posible acceder a todos los nodos directamente o con el uso de nodos intermedios. Las distancias en esta matriz ya consideran la suma de visitar los nodos intermedios necesarios para llegar al nodo destino.

Por otra parte, el algoritmo también muestra la manera en la que se lleva a cabo cada ruta. Utilizando la matriz A resultante del algoritmo.

| Ruta | Hosp. | P. R. | Nodo inicial |   | Nodo final | Secuencia de nodos                                         |
|------|-------|-------|--------------|---|------------|------------------------------------------------------------|
| 1    | 1     | 2     | 1            | - | 123        | 1-40-48-64-67-77-88-97-105-114-123                         |
| 2    | 1     | 4     | 1            | - | 47         | 1-2-3-11-19-20-21-22-26-27-37-45-46-47                     |
| 3    | 1     | 7     | 1            | - | 51         | 1-2-3-11-19-33-43-51                                       |
| 4    | 2     | 3     | 48           | - | 136        | 48-64-67-77-79-80-91-99-108-117-126-136                    |
| 5    | 2     | 5     | 48           | - | 166        | 48-64-67-77-78-79-80-81-93-101-110-119-128-139-149-153-166 |
| 6    | 3     | 1     | 110          | - | 112        | 110-111-112                                                |
| 7    | 3     | 6     | 110          | - | 169        | 110-119-139-149-150-154-168-169                            |

Tabla 4.7. Secuencia de nodos intermedios. Elaboración propia.

Con la tabla anterior se obtienen las rutas completas que deberán seguir los vehículos que se dirijan hacia el punto de reunión asignado con la final de que este recorrido se lleve a cabo en el menor tiempo posible, y de esta manera se les pueda dar atención oportuna a los heridos que lo requieran.

Esto puede representarse en el mapa de la siguiente manera:



Figura 4.9. Rutas resultantes. Elaborada en Google Earth

Esto se ha obtenido de la matriz de secuencias A mostrada a continuación en la figura 4.10.

|    | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1  | 1  | 2  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 2  | 3  | 5  | 6  | 7  | 8  | 15 | 10 | 17 | 11 | 19 | 20 | 21 |
| 2  | 1  | 2  | 3  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 10 | 3  | 5  | 6  | 7  | 8  | 15 | 10 | 17 | 11 | 19 | 20 | 21 |
| 3  | 2  | 2  | 3  | 4  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 2  | 11 | 5  | 6  | 7  | 8  | 15 | 10 | 17 | 11 | 19 | 20 | 21 |
| 4  | 3  | 3  | 3  | 4  | 5  | 5  | 6  | 7  | 8  | 3  | 11 | 5  | 6  | 7  | 8  | 15 | 19 | 19 | 11 | 12 | 20 | 13 |
| 5  | 4  | 4  | 4  | 4  | 5  | 6  | 6  | 7  | 8  | 4  | 4  | 12 | 6  | 7  | 8  | 15 | 19 | 19 | 11 | 12 | 20 | 13 |
| 6  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 6  | 7  | 7  | 8  | 5  | 5  | 13 | 13 | 7  | 8  | 15 | 20 | 20 | 20 | 13 | 22 | 13 |
| 7  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 7  | 8  | 8  | 6  | 6  | 13 | 6  | 14 | 8  | 15 | 20 | 20 | 20 | 13 | 22 | 13 |
| 8  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 8  | 9  | 7  | 7  | 15 | 15 | 15 | 15 | 20 | 20 | 20 | 20 | 15 | 23 | 23 |
| 9  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 9  | 8  | 8  | 16 | 16 | 16 | 16 | 20 | 20 | 20 | 20 | 16 | 23 | 23 |
| 10 | 2  | 2  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 10 | 11 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 17 | 17 | 11 | 19 | 20 | 21 |
| 11 | 3  | 3  | 3  | 4  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 10 | 11 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 19 | 19 | 19 | 19 | 20 | 21 |
| 12 | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 13 | 13 | 15 | 16 | 20 | 20 | 12 | 13 | 13 | 14 | 15 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 21 |
| 13 | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 6  | 15 | 16 | 20 | 20 | 12 | 13 | 14 | 14 | 15 | 20 | 20 | 20 | 12 | 22 | 22 |
| 14 | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 7  | 15 | 16 | 20 | 20 | 13 | 13 | 14 | 15 | 15 | 20 | 20 | 20 | 13 | 23 | 23 |
| 15 | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 8  | 16 | 20 | 20 | 14 | 14 | 14 | 15 | 16 | 20 | 20 | 20 | 14 | 23 | 23 |
| 16 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 9  | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 15 | 16 | 20 | 20 | 20 | 15 | 23 | 23 |
| 17 | 10 | 10 | 10 | 19 | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | 10 | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 17 | 18 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 18 | 17 | 17 | 17 | 19 | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | 17 | 19 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 17 | 18 | 19 | 19 | 20 | 21 |
| 19 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 20 | 20 | 20 | 20 | 11 | 11 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 18 | 18 | 19 | 20 | 20 | 21 |
| 20 | 19 | 19 | 19 | 12 | 12 | 13 | 13 | 15 | 16 | 19 | 19 | 12 | 12 | 13 | 14 | 15 | 19 | 19 | 19 | 20 | 21 | 21 |
| 21 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 22 | 22 | 23 | 23 | 20 | 20 | 20 | 22 | 23 | 23 | 23 | 20 | 20 | 20 | 20 | 21 | 22 |
| 22 | 21 | 21 | 21 | 13 | 13 | 13 | 13 | 23 | 23 | 21 | 21 | 21 | 13 | 23 | 23 | 23 | 21 | 21 | 21 | 21 | 21 | 22 |

Figura 4.10. Matriz de secuencias A resultante. Elaboración propia.

Debido a que la matriz de distancias es simétrica, en esta matriz también se puede trabajar con la matriz triangular superior. Esta matriz se utilizó de la siguiente manera:

Si se desea conocer la secuencia de la ruta más corta de ir del nodo 1 al nodo 6 entonces nos ubicamos en la casilla (1, 6) ya que en esta casilla existe un número diferente al nodo destino se considera a este número como un nodo intermedio. En este caso el valor en la casilla es el número 5, por lo que la secuencia es 1-5-6. Ahora revisamos la casilla (1, 5) que es 4 e implica visitar el nodo intermedio 4, entonces la secuencia es 1-4-5-6. Se procede a revisar la casilla (1, 4) que es 3, entonces se requiere pasar por el nodo 3 antes de llegar al cuatro, la secuencia es 1-3-4-5-6. Se revisa la casilla (1, 3) que es 2 e implica pasar por el nodo 2 y la secuencia queda 1-2-3-4-5-6. Se revisa la casilla (1, 2) que es 2, esto nos dice que para ir del nodo 1 al dos, se pasa por el nodo 2, la interpretación de esto es que se accede directamente al nodo 2 desde el nodo 1 pues no hay nodos intermedios. Entonces la secuencia resultante de ir del nodo 1 al 6 es 1-2-3-4-5-6 con una distancia total de 841 obtenida de la casilla (1, 6) de la matriz de distancias resultante en la figura 4.8.



Para verificar el modelo de ruta más corta se revisaron minuciosamente las conexiones entre nodos y las respuestas en la matriz de secuencias, el ejemplo anterior se puede verificar en el mapa con los nodos numerados en la siguiente figura.

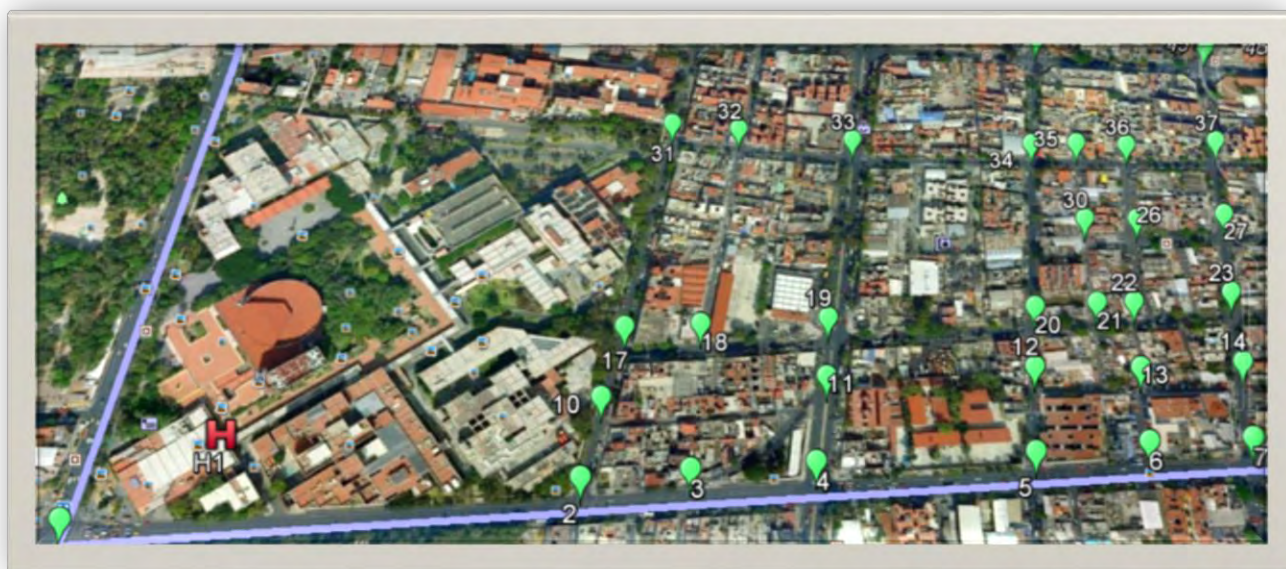


Figura 4.11 Verificación de la secuencia 1-2-3-4-5-6. Elaborada con Google Earth.

Es importante mencionar que este trabajo propone una manera de actuar ante una situación difícil para todos de manera que se puedan efectuar las operaciones de manera organizada bajo un mismo objetivo. Es evidente que una situación de desastre es totalmente impredecible y seguramente el sistema real será muy diferente al mostrado en esta investigación.

Es por eso que se reconoce que los modelos aquí usados son herramientas útiles pero que quizá en el momento más difícil no sean usados, no por otro motivo diferente al de utilizar herramientas más accesibles. De acuerdo con esto, para la generación de rutas en tiempo real se pueden obtener mediante aplicaciones de sistemas de información geográfica (SIG) que se pueden descargar a dispositivos móviles. Difícilmente se puede conocer con certeza los algoritmos bajo los cuales trabajan estos sistemas pero ya que uno de los objetivos de esta investigación fue el mostrar la utilidad de los modelos en situaciones de desastre, descubrimos que por medio de la solución de los modelos de cobertura y de ruta más corta se pueden administrar recursos en dado caso de no contar con otras herramientas como los SIG, al menos, para contar con rutas iniciales.

Algunas aplicaciones que sirven para la generación de rutas en tiempo real son Maps, Google Earth y MapRuta de Google. Estas aplicaciones y software son fáciles de usar y son compatibles con distintos dispositivos móviles como celulares. MapRuta, incluso, podría ser una aplicación eficiente en la generación de rutas a vehículos que recogieran a más heridos visitando más puntos de reunión y regresando al hospital de donde salieron.

El algoritmo programado y utilizado en esta podría ser repartido a los hospitales en forma de aplicación para dispositivos móviles para los operadores de ambulancias lo cual, bien puede ser parte de un trabajo futuro.

## Conclusiones

Se diseñó y propuso un plan de acción para los hospitales que ponen a disposición sus recursos en casos de desastres naturales cumpliendo con el objetivo general de la investigación. Describiendo a detalle las fases de las que éste cuenta y sus principales actividades y actores, de tal forma que se propuso una manera de administrar los recursos, hospitales y ambulancias por medio de herramientas de Investigación de Operaciones.

Se describió de manera general el “Plan sismo”, mostrando las actividades que comprende y algunas áreas de oportunidad

Por medio de la solución de un problema de cobertura, se pudo determinar qué puntos de reunión atiende cada hospital de manera que todos reciban atención y se contribuya a disminuir el tiempo de viaje que les toma a las ambulancias, para esto, también se propuso un algoritmo para solucionar el problema de ruta más corta para asegurar que las ambulancias se dirijan al punto de reunión por el camino más corto, lo cual es consistente con la idea de trasladar a un herido en el menor tiempo posible pues así contribuye a brindar atención médica pronta a los heridos que acudan a los puntos de reunión. Cabe mencionar que a este algoritmo se le puede actualizar la información y es posible recalcular rutas cuantas veces sea necesario.

Se lograron determinar los lugares que pueden ser utilizados como puntos de reunión en una situación de terremoto de acuerdo con las características de puntos de reunión.

Se desarrollaron los modelos de cobertura y de ruta más corta aplicados al problema que contribuyen a la optimización del traslado de heridos mediante la minimización de distancia recorrida desde los hospitales hacia los puntos de reunión. Es importante comentar que el uso del modelo de ruta más corta nos da la posibilidad de encontrar nuevas rutas ya que, como se comentó a lo largo de esta investigación, en una situación de desastre no se puede predecir las rutas que permanecerán libres y despejadas para el uso de ambulancia sino que es un sistema indeterminado que en el momento de desastre puede ser cambiante. Aún con esto, por medio de este modelo, es posible indicar a los hospitales cuáles son las rutas óptimas para llegar a los puntos de reunión de manera anticipada, incluso antes de una situación de desastre.

El uso de estrategias establece un marco de acción ante un problema o una situación con la finalidad de alcanzar, en la mejor medida, el objetivo propuesto. Es por esto que ante situaciones de desastre o de peligro las estrategias son funcionales ya que evitan el caos y las actuaciones sin objetivos claros. La

propuesta de este trabajo incide en la idea de que las acciones con orden ayudan a alcanzar los objetivos propuestos, en este caso el traslado rápido de heridos.

México tiene un alto grado de actividad sísmica, por lo que debe quedar claramente descrita, para la sociedad y organismos que participan, la manera en que las autoridades actuarán ante una situación de terremoto a fin de alcanzar los objetivos propuestos del plan que se implemente. De esta manera se entiende que la participación conjunta tanto de organismos de salud, como la sociedad, es esencial para el logro de objetivos en la ejecución de una estrategia. Por lo que se deben dejar en claro las acciones que cada organismo e individuo realiza, ya que con este conocimiento se evita el entorpecimiento en las diferentes tareas que surgen en una situación de riesgo de este tipo.

La participación activa de la población hará que estrategias como ésta tengan un alto grado de funcionalidad, para esto se requiere que la población tenga conocimiento de qué son y para qué sirven las estrategias.

Los modelos que durante mucho tiempo ha estudiado la Investigación de Operaciones son herramientas útiles y eficaces ante los problemas que aquejan a la sociedad, no sólo a la industria.



## Apéndice

Los sismólogos usan la escala de magnitud para representar la energía sísmica liberada por cada terremoto. A continuación se presenta una tabla con los efectos típicos de los terremotos en diversos rangos de magnitud:

### Terremotos

#### Magnitud en escala Richter

#### Efectos del terremoto

|              |                                                                |
|--------------|----------------------------------------------------------------|
| Menos de 3.5 | Generalmente no se siente, pero es registrado                  |
| 3.5-5.4      | A menudo se siente, pero sólo causa daños menores.             |
| 5.5-6.0      | Ocasiona daños ligeros a edificios.                            |
| 6.1-6.9      | Puede ocasionar daños severos en áreas donde vive mucha gente. |
| 7.0-7.9      | Terremoto mayor. Causa graves daños.                           |
| 8 o mayor    | Gran terremoto. Destrucción total a comunidades cercanas       |

Aunque cada terremoto tiene una magnitud única, su efecto variará grandemente según la distancia, la condición del terreno, los estándares de construcción y otros factores. Los sismólogos usan diferentes valores de la escala de Intensidad Mercalli para describir los distintos efectos de un terremoto.

Cada terremoto tiene una cantidad única de energía, pero los valores de magnitud dados por los diferentes observatorios sismológicos para un mismo evento pueden variar. Dependiendo del tamaño, la naturaleza y la ubicación de un terremoto, los sismólogos utilizan diferentes métodos para estimar la magnitud. En el caso de muchos eventos, es difícil estimar la magnitud con una precisión de más de 0.2 unidades, y los sismólogos frecuentemente verifican las magnitudes estimadas a través de la obtención y análisis de datos adicionales.

Obtenido de: <http://www2.ssn.unam.mx:8080/website/jsp/Richter/richter.jsp>

## Anexo

Programa que resuelve el problema de ruta más corta por medio del algoritmo de Floyd.

*Desarrollado en: Visual Basic*

*Por: Ing. Luis Israel Godínez Gil y Act. Blanca Esthela García Flores*

*Posgrado de la Facultad de Ingeniería, Ingeniería de Sistemas. UNAM, 2015.*

Sub RUTA\_MAS\_CORTA()

Dim I, J, K, NODOS As Integer

Dim COSTOS As Variant

Set DISTANCIAS = Application.InputBox("Seleccciona las distancias", "DistanCias / Costos", "", Type:=8)

NODOS = DISTANCIAS.Rows.Count

Worksheets("A").Range("A1:KO300").ClearContents

Worksheets("Cambios").Range("A1:KO300").ClearContents

For I = 1 To NODOS

    Worksheets("A").Cells(I + 1, 1) = I

    Worksheets("A").Cells(1, I + 1) = I

        For J = 1 To NODOS

            Worksheets("A").Cells(I + 1, J + 1) = J

            If DISTANCIAS(I, J) = "" Then

                DISTANCIAS(I, J) = 1000000

```

        End If
    Next J
Next I

Worksheets("DISTANCIAS").Activate
Worksheets("Distancias").Range("A1:KO300").Select
Worksheets("Distancias").Range("A1:KO300").Copy
ActiveSheet.Paste Destination:=Worksheets("Cambios").Range("A1:KO300")
ReDim COSTOS(NODOS - 1, NODOS - 1)
For K = 1 To NODOS
    For I = 1 To NODOS
        For J = I + 1 To NODOS
            COSTOS(I - 1, J - 1) = WorksheetFunction.Min(DISTANCIAS(I, J),
DISTANCIAS(I, K) + DISTANCIAS(K, J))
            Worksheets("Cambios").Cells(I + 1, J + 1) = COSTOS(I - 1, J - 1)
            If COSTOS(I - 1, J - 1) <> DISTANCIAS(I, J) Then
                Worksheets("A").Cells(I + 1, J + 1) = K
                Worksheets("A").Cells(J + 1, I + 1) = K
            End If
            DISTANCIAS(I, J) = COSTOS(I - 1, J - 1)
            DISTANCIAS(J, I) = COSTOS(I - 1, J - 1)
            Worksheets("dISTANCIAS").Range("FU4") = I
            Worksheets("dISTANCIAS").Range("FU5") = J
            Worksheets("dISTANCIAS").Range("FU6") = K
        Next J
    Next I
Next I

```

Next K

End Sub

## Bibliografía

1. Caunhye, A., Nie, X., Pokharel, S. (2012). *Optimization Models in Emergency Logistics: A Literature Review*. Socio-Economic Planning Sciences 46: 4-13.
2. Checkland, P.B. and J. Scholes (2001) *Soft Systems Methodology in Action*, in J. Rosenhead and J. Mingers (eds), *Rational Analysis for a Problematic World Revisited*. Chichester: Wiley
3. Estrategia de preparación y respuesta de la Administración Pública Federal, ante un sismo y tsunami de gran magnitud "Plan Sismo".
4. Flores de la Mota, Idalia. *Apuntes Teoría de Redes*. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, 1999, 181p.
5. Fiedrich, F., Gehbauer, F. & Rickers U. (2000) *Optimized Resource Allocation for Emergency Response after Earthquake Disasters*. Institute für Maschinenwesen im Baubetrieb, Universität Karlsruhe, D-76128 Karlsruhe, Germany.
6. Green III & Altay (2006). *OR/MS research in disaster operations management*. European Journal of Operational Research 175 (2006) 475–493.
7. Hiller & Lieberman (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. Novena Edición. McGraw Hill.
8. Hossein (2011). *Design A Routing-Allocation Model for Relief Transportation of the Earthquake Wounded Using Simulated Annealing Method*. European Journal of Economics, Finance and Administrative Sciences Issue 30.
9. Itaim Ananias, Pablo (2005). Resolución del problema de Set-Covering utilizando un algoritmo genético. Vaparaíso.
10. Najafi, M., Eshghi, K., Dullaert W. (2012). *A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase*. *Transportation Research Part E* 49(2013) 217-249.
11. Taha, Handy A. (2012). *Investigación de operaciones*. Novena Edición. Pearson.
12. Taillard, et al. (2003), *Metaheuristics for Hard Optimization*. Springer.
13. Toth & Vigo. *The Vehicle Routing Problem*. *SIAM monographs on discrete mathematics and applications* (2001).

14. Viswanath & Peeta (2003). *The Multicommodity Maximal Covering Network Design Problem for Planning Critical Routes for Earthquake Response*. Submitted for presentation at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 12-16, 2003, Washington D.C., and for publication in Transportation Research Record.
15. Yañez Mancilla Beatriz (2013), Modelo de ruteo para generar rutas turísticas. UNAM, Facultad de Ingeniería.
16. Yi W., & Kumar A. (2007). *Ant Colony Optimization for disaster relief operations*. Transportation Research Part E; Logistics and Transportation Review; 43(6):660-72
17. Yi W. & Özdamar L. (2007). *A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities*. European Journal of Operational Research; 179(3):1177-93
18. Yuan Y. & Wang D. (2009). *Path selection model and algorithm for emergency logistics management*. Computers & industrial Engineering; 56(3):1081-94
19. Zhang (2012). *Route selection for emergency logistics management: A bio-inspired algorithm*. Safety Science 54 (2013) 87–91.

#### Recursos electrónicos

1. <http://www.cenapred.unam.mx/>
2. [http://www.cires.org.mx/1985\\_es.php](http://www.cires.org.mx/1985_es.php)
3. <http://www.cuauhtemoc.df.gob.mx/paginas.php?id=entorno>
4. <http://www.eluniversal.com.mx/ciudad/108037.html>
5. <http://www.obras.df.gob.mx/>
6. [http://www.salud.df.gob.mx/ssdf/dmdocuments/Directorio\\_salud.pdf](http://www.salud.df.gob.mx/ssdf/dmdocuments/Directorio_salud.pdf)
7. <http://www.sismos.gob.mx/>
8. <http://www.ssn.unam.mx/>
9. <http://www.tembloresenmexico.com/>